

---

# Parametrische Audiocodierung für sehr niedrige Datenraten

Heiko Purnhagen

Laboratorium für Informationstechnologie  
Leibniz Universität Hannover

28. November 2008

---

# Very Low Bit Rate Parametric Audio Coding

Heiko Purnhagen

Laboratorium für Informationstechnologie  
Leibniz Universität Hannover

28. November 2008

# Gliederung

---

- Einleitung
- Grundlagen der parametrischen Audiocodierung
- Quellenmodell und Parameterschätzung
- Signalzerlegung und Auswahl von Signalkomponenten
- Parametercodierung und Signalsynthese
- Experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Einleitung

---

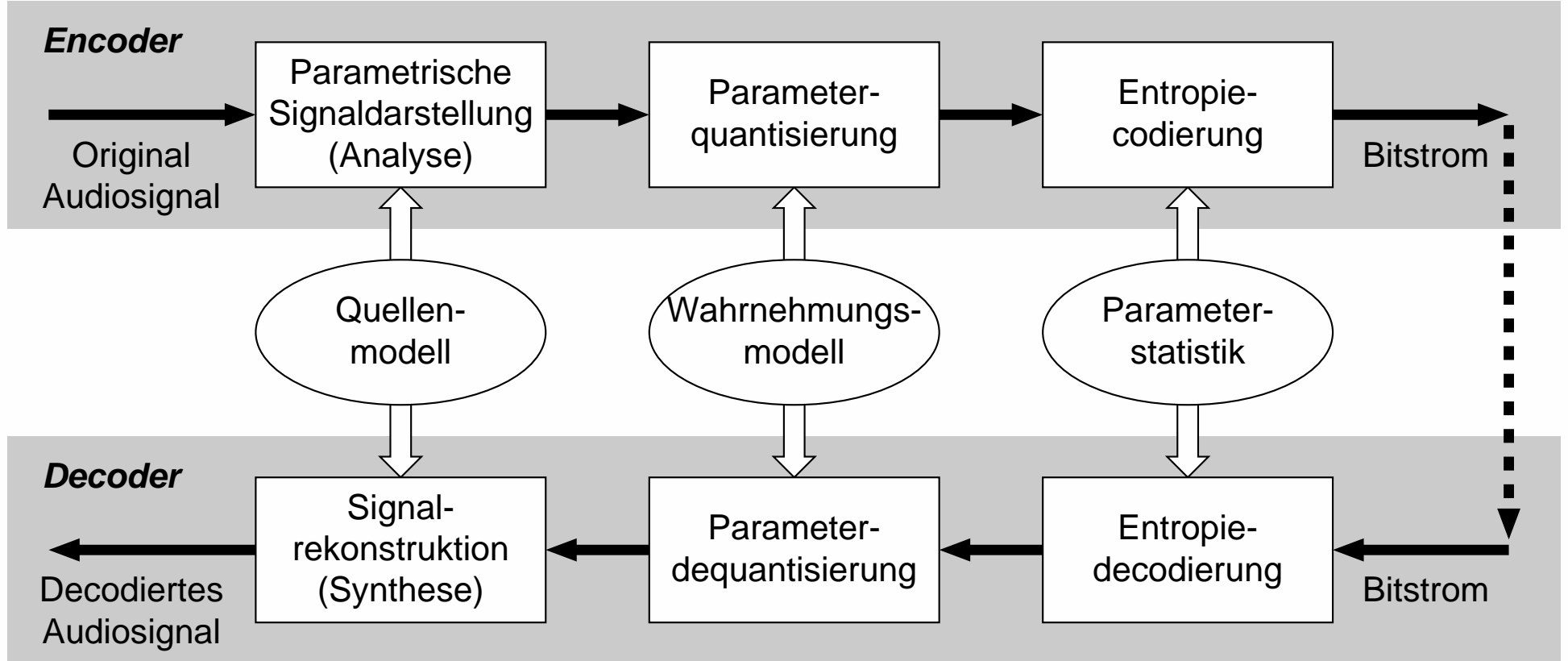
- Effiziente Übertragung und Speicherung von Audiosignalen
  - Compact Disc: 1,4 Mbit/s
  - Quellencodierung ermöglicht Datenratenreduktion
- Etablierte Ansätze zur Quellencodierung von Audiosignalen
  - **Transformationscoder** (mp3, AAC, ...)
    - Einfaches Quellenmodell
      - nicht effizient für Sprachsignale
    - Leistungsfähiges Wahrnehmungsmodell (Gehör)
  - **Sprachcoder** (Mobiltelefon, ...)
    - Spezifisches Quellenmodell für Sprachsignale (Vokaltrakt)
      - problematisch für andere Signale
    - Einfaches Wahrnehmungsmodell

# Einleitung

---

- Ziel dieser Arbeit
  - Effiziente Codierung von **beliebigen** Audiosignalen bei **sehr niedrigen** Datenraten (6 bis 16 kbit/s)
- Lösungsansatz
  - **Hybrides** Quellenmodell
    - Kombination verschiedener Quellenmodelle für Signalkomponenten
  - Verwendung einfacher Signalkomponenten mit wenigen **Parametern** (z.B. Sinustöne, Rauschen)
    - ermöglicht automatische Signalzerlegung im Encoder
  - Leistungsfähiges Wahrnehmungsmodell
    - Nachbildung des **Klangs** (nicht der Wellenform)

# Grundlagen der parametrischen Audiocodierung



Vereinfachtes Blockdiagramm: Encoder und Decoder

# Gliederung

---

- Einleitung
- Grundlagen der parametrischen Audiocodierung
- **Quellenmodell und Parameterschätzung**
- Signalzerlegung und Auswahl von Signalkomponenten
- Parametercodierung und Signalsynthese
- Experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Entwicklung eines hybriden Quellenmodells

- **Hybrides Quellenmodell**

- Additive Kombination verschiedener Signalkomponenten

- **Sinuston-Trajektorien:** Kontinuierliche Phase  $\varphi_i(t)$

$I$  Sinustöne:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I a_i(t) \cos \left( \overbrace{\varphi_{0,i} + 2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau} \right)$$

Modellparameter:

- Amplitude:  $a_i(t)$
- Frequenz:  $f_i(t)$
- Startphase:  $\varphi_{0,i}$



# Entwicklung eines hybriden Quellenmodells

- **Hybrides Quellenmodell**

- Additive Kombination verschiedener Signalkomponenten
- Frame-basiert: Ein Parametersatz pro Frame (typ.  $T_f = 32$  ms)

- **Sinuston-Trajektorien:** Kontinuierliche Phase  $\varphi_i(t)$

$I$  Sinustöne:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I a_i(t) \cos \left( \overbrace{\varphi_{0,i} + 2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau} \right)$$

Modellparameter:

- Amplitude:  $a_i(qT_f) = a_i^{(q)}$
- Frequenz:  $f_i(qT_f) = f_i^{(q)}$
- Startphase:  $\varphi_{0,i}$

**Synthese:**

Interpolation  $a_i^{(q-1)} \rightarrow a_i^{(q)}$

Interpolation  $f_i^{(q-1)} \rightarrow f_i^{(q)}$

Durch Zufallswert ersetzbar

# Entwicklung eines hybriden Quellenmodells

- **Harmonischer Ton:** Grundton und Obertöne  $\rightarrow I_h$  Partialtöne

$$f_{i,h} = i f_h \quad \text{mit } i = 1, \dots, I_h$$

$$a_{i,h} = a_h |H_s(2\pi i f_h)|$$

Modellparameter:

- Amplitude:  $a_h = \sqrt{\sum_{i=1}^{I_h} a_{i,h}^2}$
- Grundfrequenz:  $f_h$
- Spektrale Hüllkurve:  $|H_s(\Omega)|$  mit  $0 \leq \Omega \leq 2\pi(I_h + 1)f_h$

$\rightarrow$  normierte Übertragungsfunktion eines Allpol-Filters

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{p=1}^P a_p z^{-p}} \quad (\text{Ordnung } P, \text{ Filterkoeffizienten } a_p)$$

# Entwicklung eines hybriden Quellenmodells

- **Harmonischer Ton:** Grundton und Obertöne  $\rightarrow I_h$  Partialtöne

$$f_{i,h} = i f_h \cdot (1 + \kappa_h i) \quad \text{mit } i = 1, \dots, I_h$$

$$a_{i,h} = a_h |H_s(2\pi i f_h)|$$

Modellparameter:

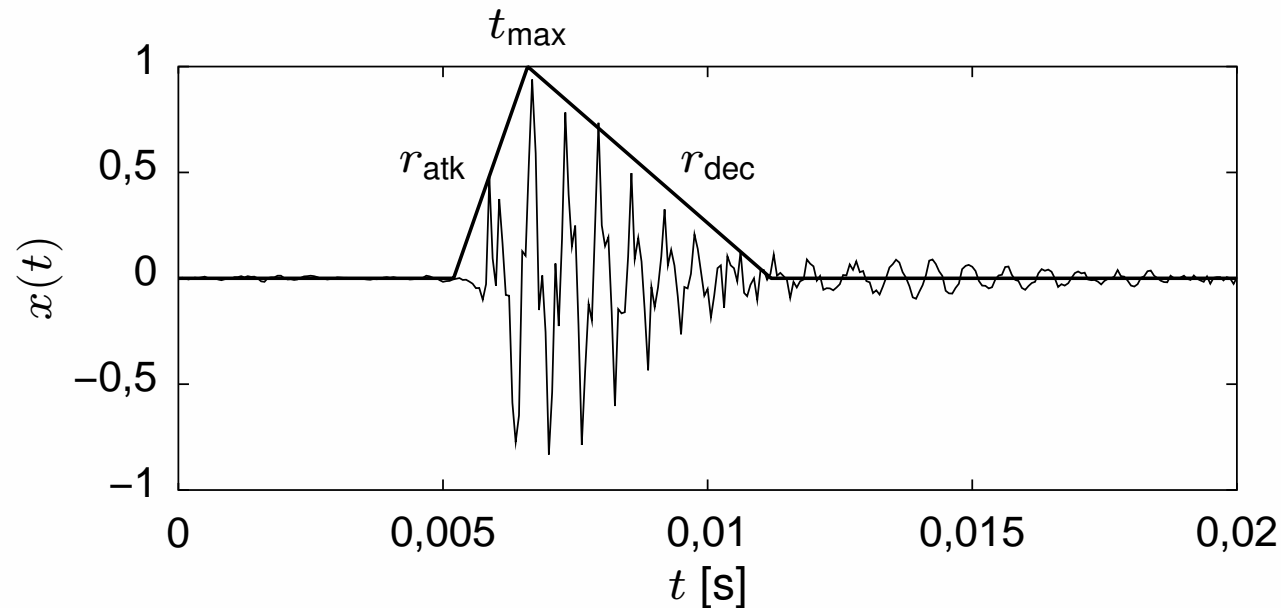
- Amplitude:  $a_h = \sqrt{\sum_{i=1}^{I_h} a_{i,h}^2}$
- Grundfrequenz:  $f_h$
- Inharmonizität:  $\kappa_h$  (z.B. biegesteife Saite)
- Spektrale Hüllkurve:  $|H_s(\Omega)|$  mit  $0 \leq \Omega \leq 2\pi(I_h + 1)f_h$

$\rightarrow$  normierte Übertragungsfunktion eines Allpol-Filters

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{p=1}^P a_p z^{-p}} \quad (\text{Ordnung } P, \text{ Filterkoeffizienten } a_p)$$

# Entwicklung eines hybriden Quellenmodells

- **Transiente Komponenten:** Schnelle Amplitudenänderung



Modellparameter: Optionale zeitliche Hüllkurve

- Position:  $t_{\max}$
- Attack-Rate:  $r_{\text{atk}}$
- Decay-Rate:  $r_{\text{dec}}$

# Entwicklung eines hybriden Quellenmodells

- **Rauschkomponente:** Betragsspektrum (nicht Wellenform)

$$S_{xx}(\omega) = \sigma_x^2 |H_s(e^{j\omega})|^2$$

Modellparameter:

- Amplitude:  $a_n = \sqrt{\sigma_x^2}$
- Spektrale Hüllkurve:  $|H_s(e^{j\omega})|$

→ normierte Übertragungsfunktion eines Allpol-Filters

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{p=1}^P a_p z^{-p}} \quad (\text{Ordnung } P, \text{ Filterkoeffizienten } a_p)$$

- **Kombination: Hybrides parametrisches Quellenmodell**  
→ **“Harmonic and Individual Lines plus Noise” (HILN)**

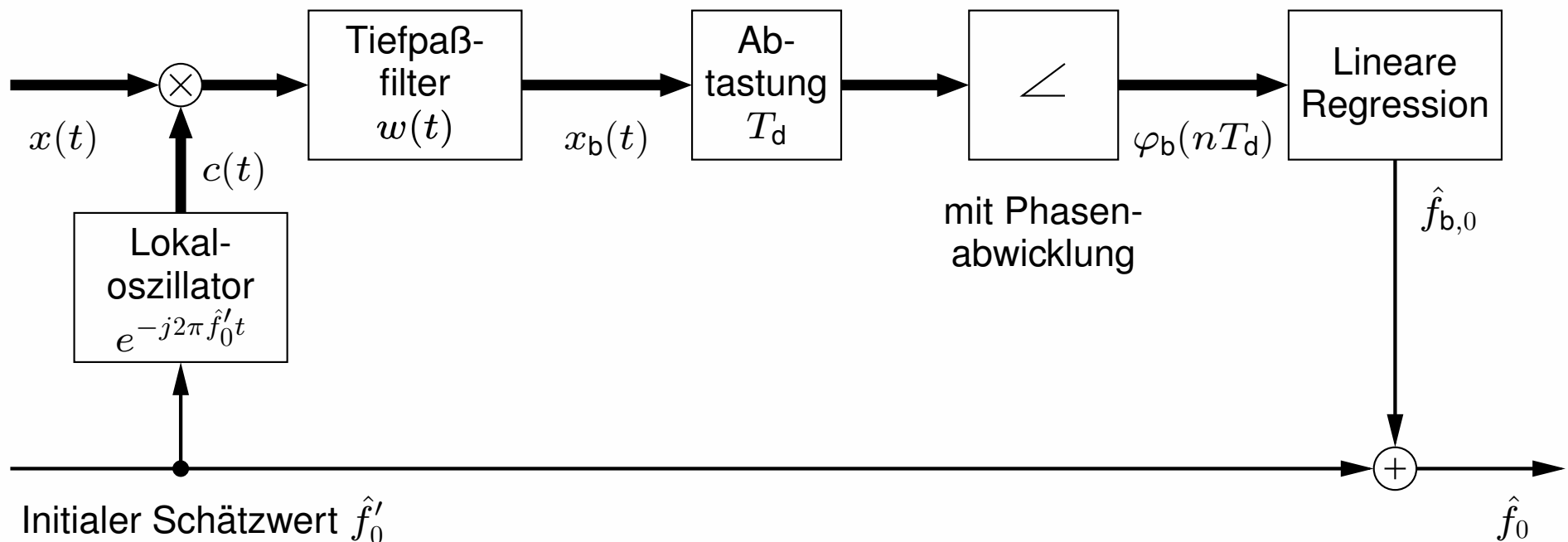
# Schätzung der Parameter von Signalkomponenten

---

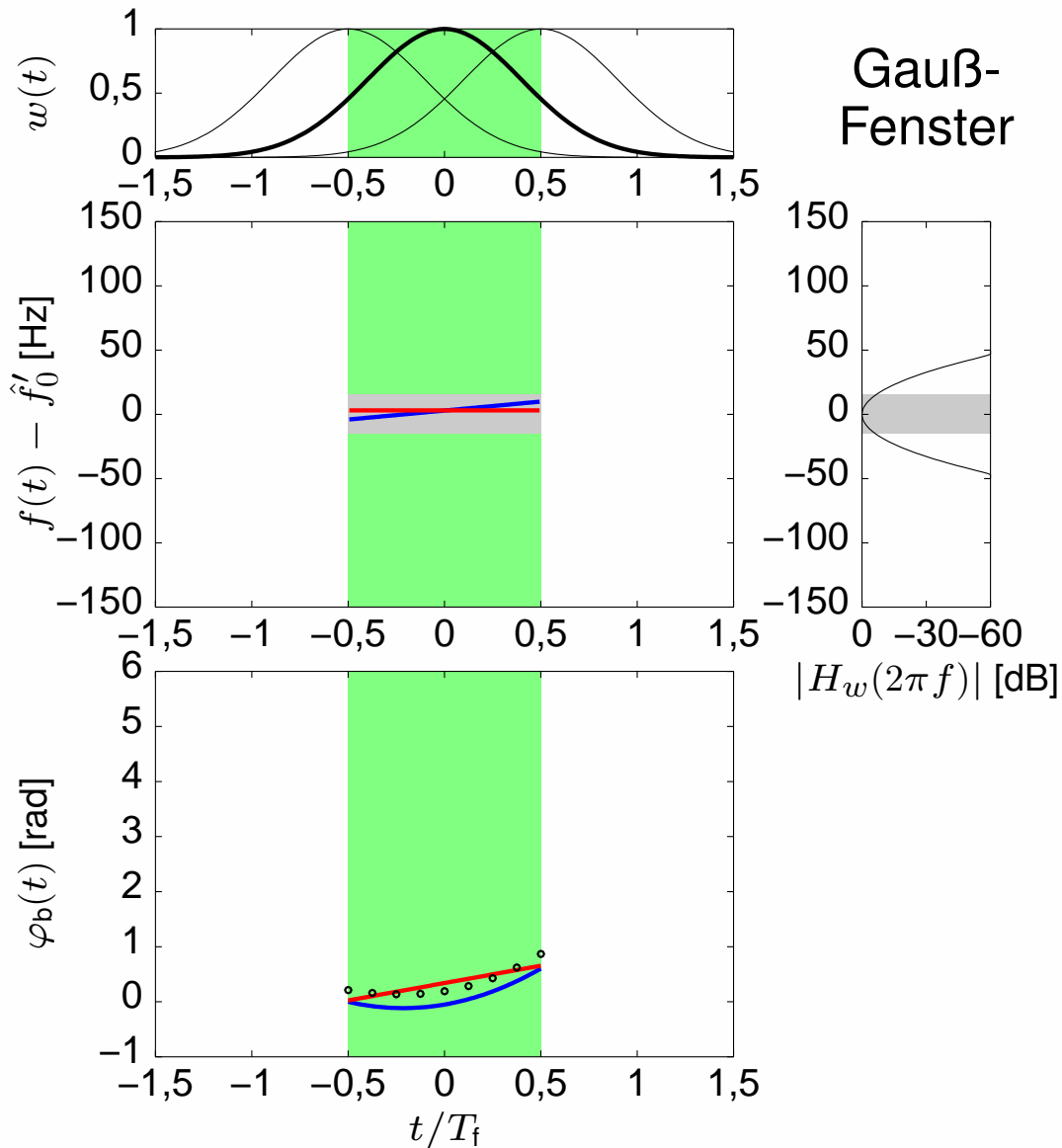
- Ziel
  - Genaue Schätzung der Parameter **einer** Signalkomponente
  - Robust gegen Störung durch andere Signalkomponenten  
→ vereinfacht Signalzerlegung
- Schätzung der Parameter eines Sinustons
  - Schritt 1: Schätzung der Frequenz  
→ z.B. Position des Maximums im Betragsspektrum
  - Schritt 2: Schätzung der Amplitude und Phase  
→ Minimierung des quadratischen Modellierungsfehlers

# Frequenz-Schätzung: Sinuston mit konstanter Frequenz

- Konstante Frequenz  $\rightarrow$  lineare Phase  $\hat{\varphi}[n] = \hat{\varphi}_0 + \hat{\omega}_0 n$
- Schätzung von  $\hat{\varphi}_0$  und  $\hat{\omega}_0$   
 $\rightarrow$  lineare Regression der beobachteten Phasen  $\varphi[n]$
- Initialer Schätzwert  $\hat{f}'_0$  verfügbar  $\rightarrow$  Umgebung von  $\hat{f}'_0$  betrachten  
 $\rightarrow$  Heterodyn-Ansatz (Radioempfangstechnik)

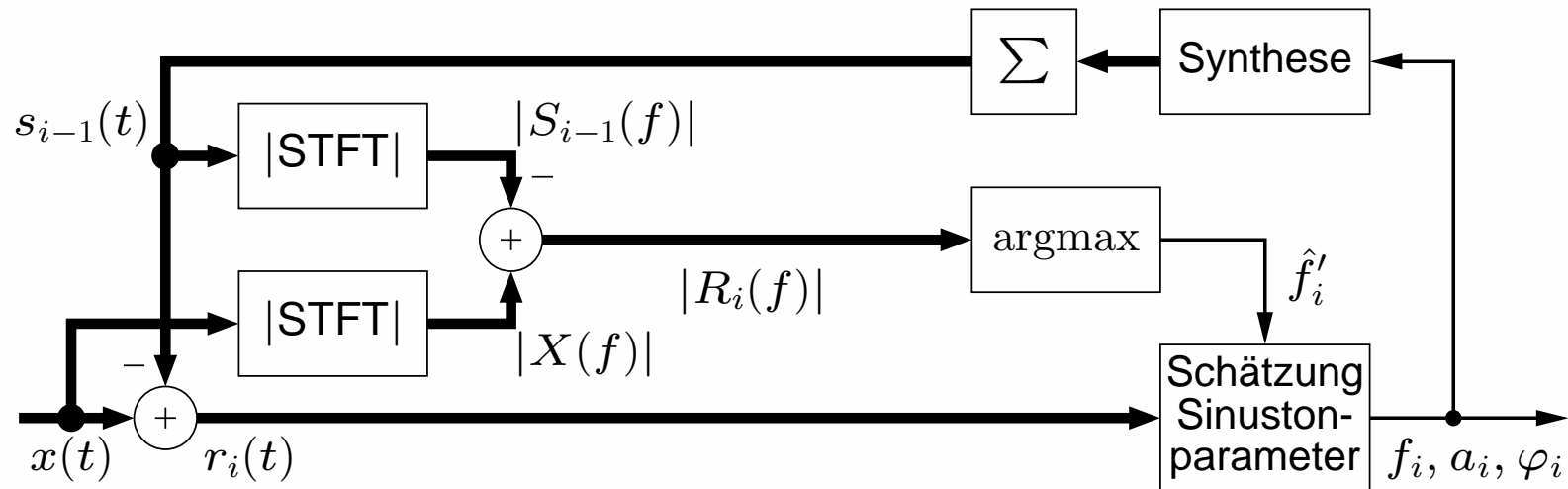


# Heterodyn-Schätzung: Konstante Frequenz





# Analyse-Synthese-Schleife: Extraktion von Sinustönen

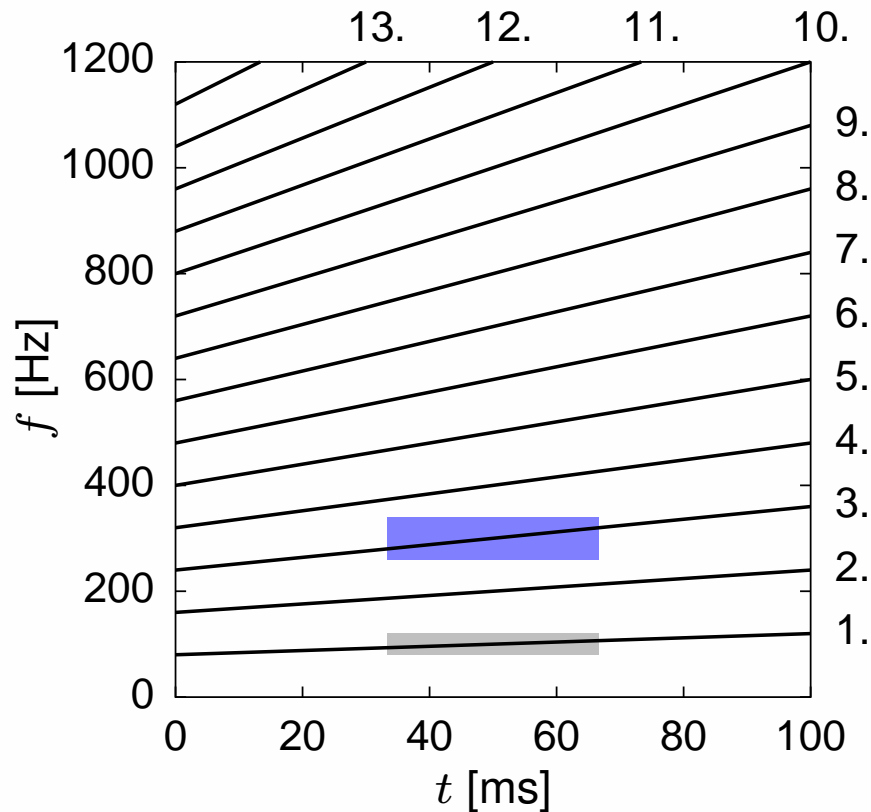


Initialer Schätzwert  $\hat{f}'_i$

→ Maximum im  $i$ -ten Residual-Betragspektrum  $|R_i(f)|$

# Erweiterungen der Heterodyn-Schätzung

- Schätzung der Frequenzänderung (Chirp Rate  $\alpha_{b,0}$ )  
→ quadratische Phase  $\hat{\varphi}_b(t) = \hat{\varphi}_{b,0} + 2\pi \hat{f}_{b,0}t + \hat{\alpha}_{b,0}t^2$



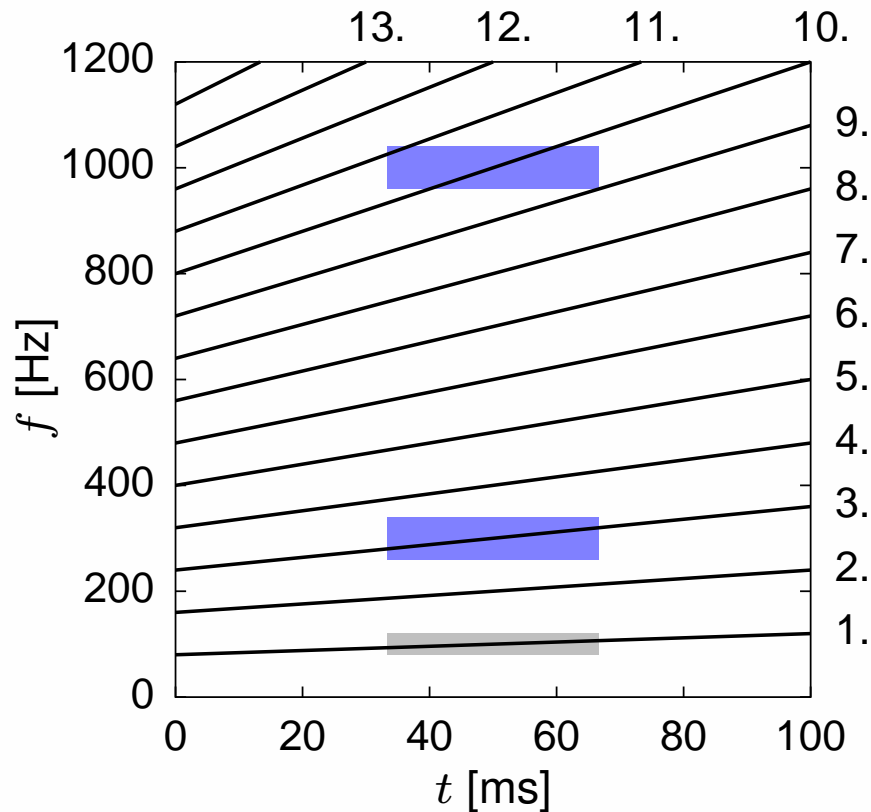
Partialtöne eines  
harmonischen Tons mit  
steigender Grundfrequenz  
 $f_h = 80 \dots 120$  Hz

$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 32 \text{ Hz}$$

$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 64 \text{ Hz}$$

# Erweiterungen der Heterodyn-Schätzung

- Schätzung der Frequenzänderung (Chirp Rate  $\alpha_{b,0}$ )  
→ quadratische Phase  $\hat{\varphi}_b(t) = \hat{\varphi}_{b,0} + 2\pi \hat{f}_{b,0}t + \hat{\alpha}_{b,0}t^2$



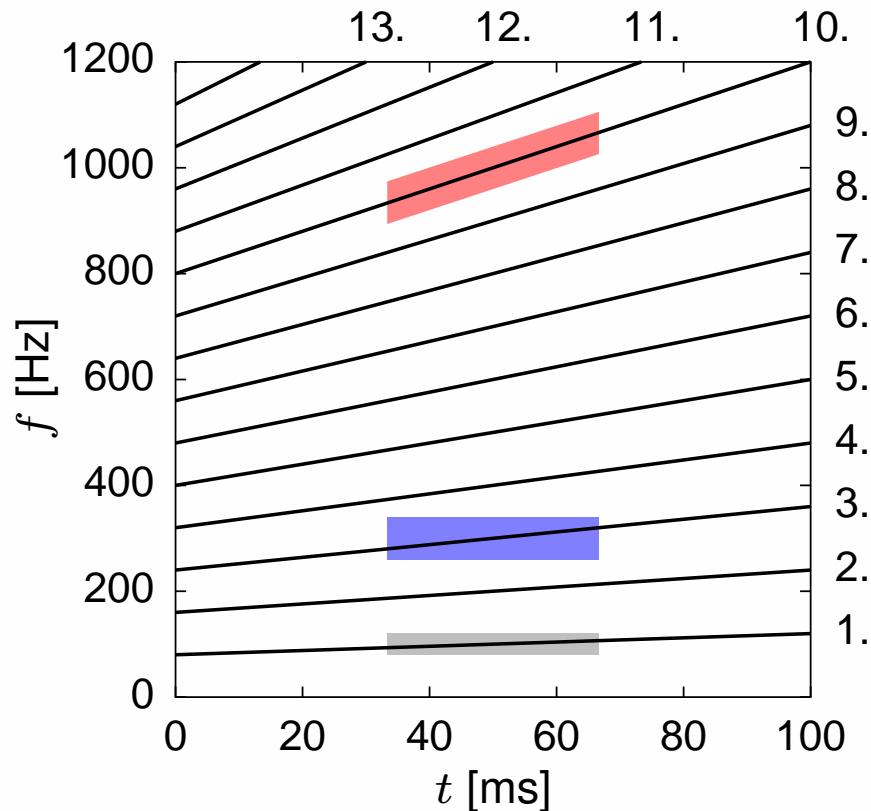
Partialtöne eines harmonischen Tons mit steigender Grundfrequenz  $f_h = 80 \dots 120$  Hz

$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 32 \text{ Hz}$$

$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 64 \text{ Hz}$$

# Erweiterungen der Heterodyn-Schätzung

- Schätzung der Frequenzänderung (Chirp Rate  $\alpha_{b,0}$ )  
→ quadratische Phase  $\hat{\varphi}_b(t) = \hat{\varphi}_{b,0} + 2\pi \hat{f}_{b,0}t + \hat{\alpha}_{b,0}t^2$
- Lokalszillator mit Frequenzänderung (aus initialer Schätzung)



Partialtöne eines harmonischen Tons mit steigender Grundfrequenz  $f_h = 80 \dots 120$  Hz

$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 32 \text{ Hz}$$

$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 64 \text{ Hz}$$

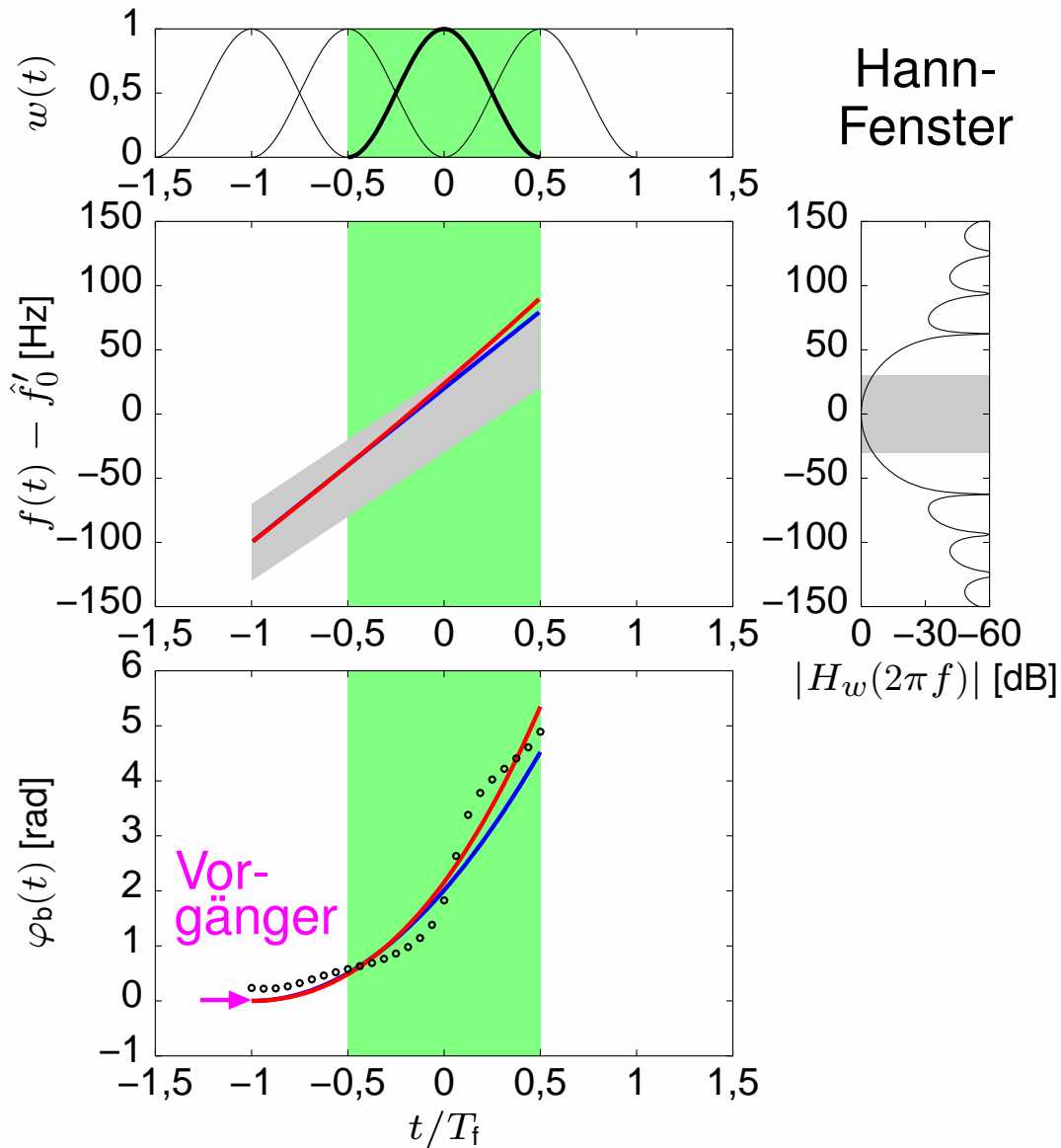
$$\Delta t = 32 \text{ ms}, \Delta f = 64 \text{ Hz}$$

# Sinuston-Trajektorien über mehrere Frames

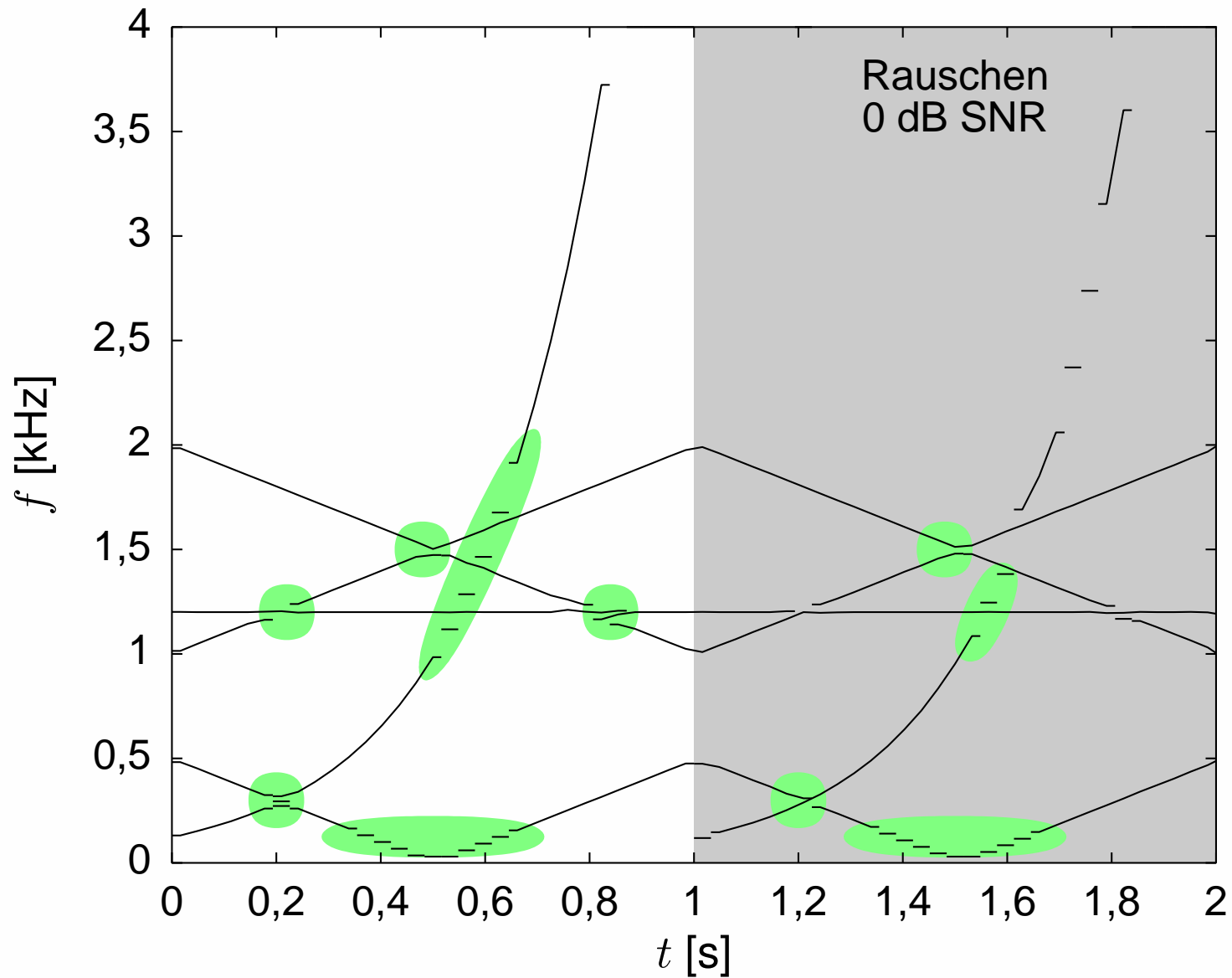
- Stadien einer Sinuston-Trajektorie
  - “birth” neuer Sinuston
  - “life” ggf. Fortsetzung von Frame zu Frame
  - “death” Ende
- Problem: Detektion und Verfolgung von Sinuston-Trajektorien
  - **Ansatz 1: Parameter-Vergleich** mit vorigem Frame  
Parameter  $f_k^{(-1)}$ ,  $a_k^{(-1)}$  des besten Vorgängers ähnlich  $f_i^{(0)}$ ,  $a_i^{(0)}$
  - **Ansatz 2: Phasen-Verfolgung** in Heterodyn-Schätzung

$$\hat{\varphi}_b(t) = \varphi_{b,0}^{(-1)} + 2\pi f_{b,0}^{(-1)}(t + T_f) + \hat{\alpha}_{b,0}(t + T_f)^2 + \hat{\beta}_{b,0}(t + T_f)^3$$

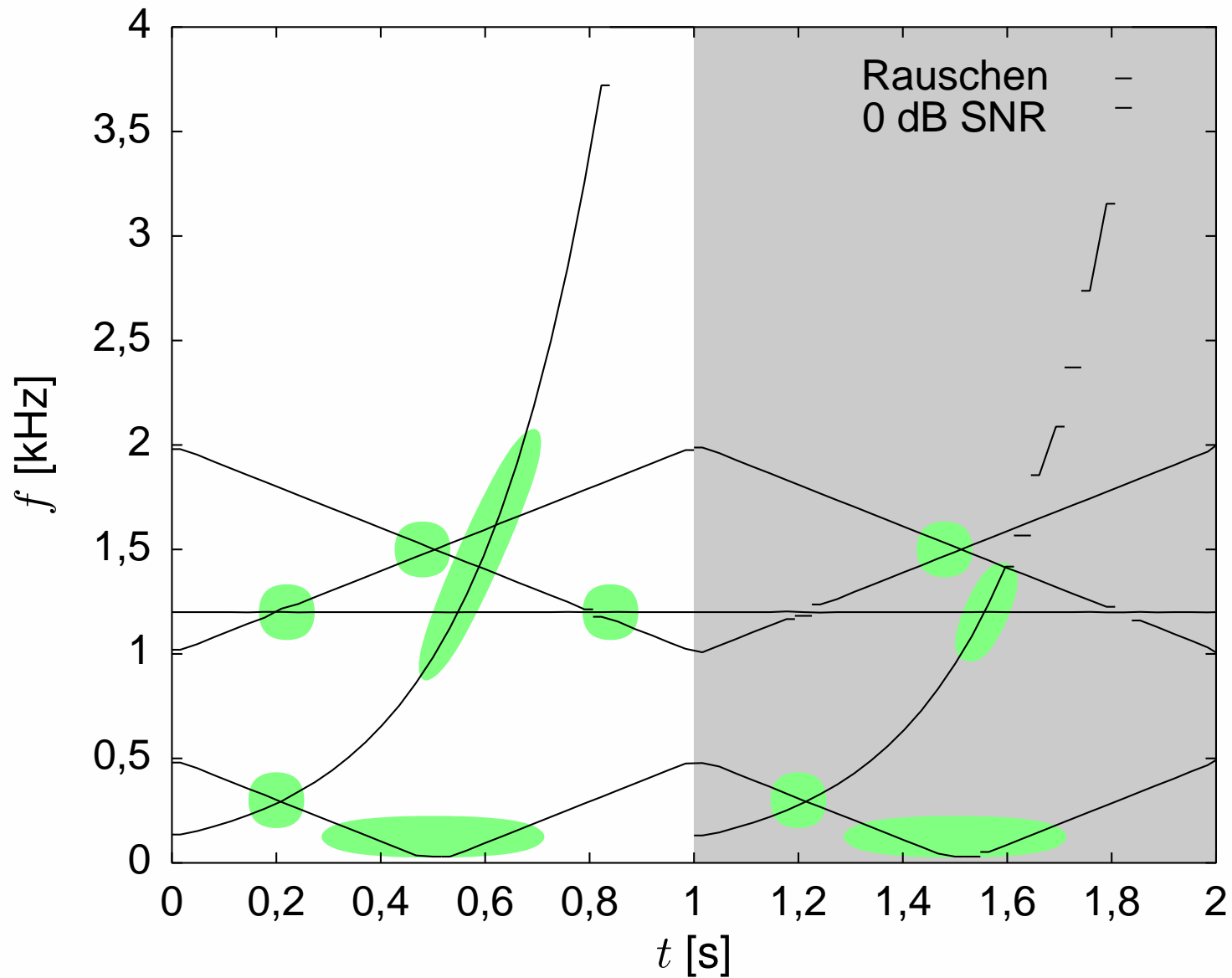
# Heterodyn-Schätzung: Phasen-Verfolgung der Trajektorie



# Sinuston-Trajektorien aus Parameter-Vergleich



# Sinuston-Trajektorien aus Phasen-Verfolgung





# Heterodyn-Schätzung: Messung des Schätzfehlers

| Frequenz-Schätzfehler $\sqrt{\text{var}(\hat{f}_r - f_r)}$ [Hz] |               |
|---|---------------|
| CR: $N = 768$   | 1,3105 (100%) |
| Messung   | 1,2308 (94%)  |

| Amplituden-Schätzfehler $\sqrt{\text{var}(\hat{a}_r - a_r)}$ |               |
|--|---------------|
| CR: $N = 512$  | 0,1397 (100%) |
| Messung  | 0,1369 (98%)  |

| Phasen-Schätzfehler $\sqrt{\text{var}(\hat{\varphi}_{r,c} - \varphi_{r,c})}$ [rad] |               |
|--|---------------|
| CR: $N = 512$  | 0,1397 (100%) |
| Messung  | 0,1757 (126%) |

4·300 Meßwerte

$f_s = 16$  kHz

$T_f = 32$  ms

Vier Sinustöne:

- Frequenz  $f_r$  (konst.)

- Amplitude  $a_r = 1$

Weißes Rauschen:

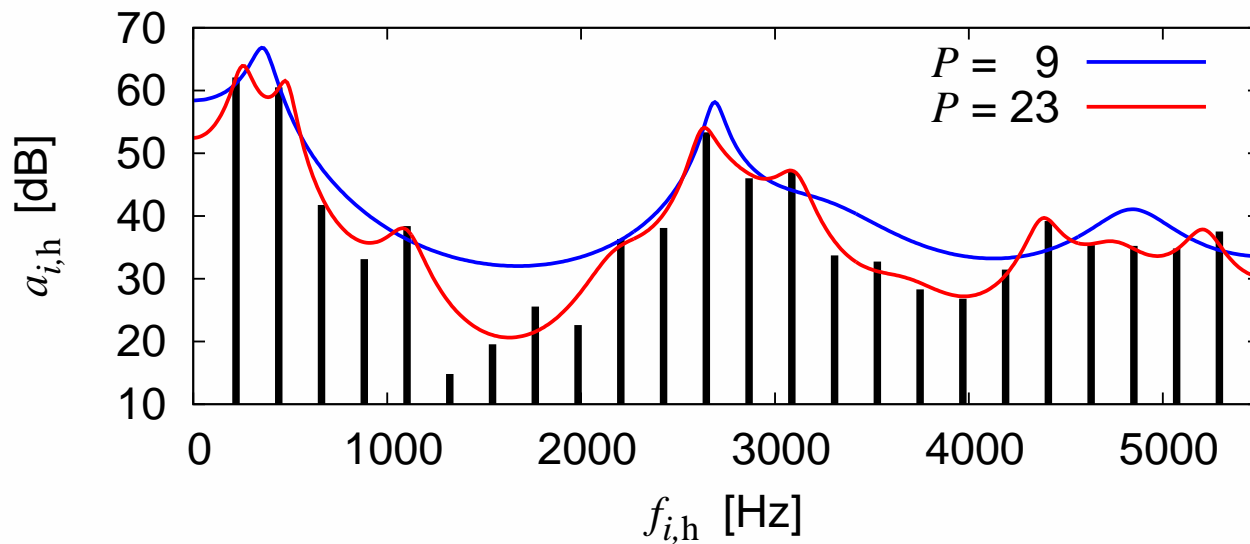
$\sigma_z^2 = 5$  (-10 dB SNR)

- Heterodyn-Schätzung mit Phasen-Verfolgung
- Cramér-Rao (CR) Grenze für Schätzung aus  $N$  Abtastwerten  
→ Heterodyn-Schätzung optimal (wenn SNR hinreichend groß)

# Harmonischer Ton: Detektion und Grundfrequenz-Schätzung

- **Ansatz: Kombination von Sinuston-Trajektorien**
- Detektion und Grundfrequenz-Schätzung
  - Suche nach Partialton-Mustern mit Grundfrequenz  $f_h$  und Inharmonizität  $\kappa_h$  in Parametern  $f_i, a_i$  aller  $I$  extrahierten Sinustöne
  - Dreistufig verfeinerte Suche über  $f_h$  von 30 Hz bis 1 kHz
- Verbleibende Trajektorien → individuelle Sinustöne

# Harmonischer Ton: Allpol-Modell der spektralen Hüllkurve



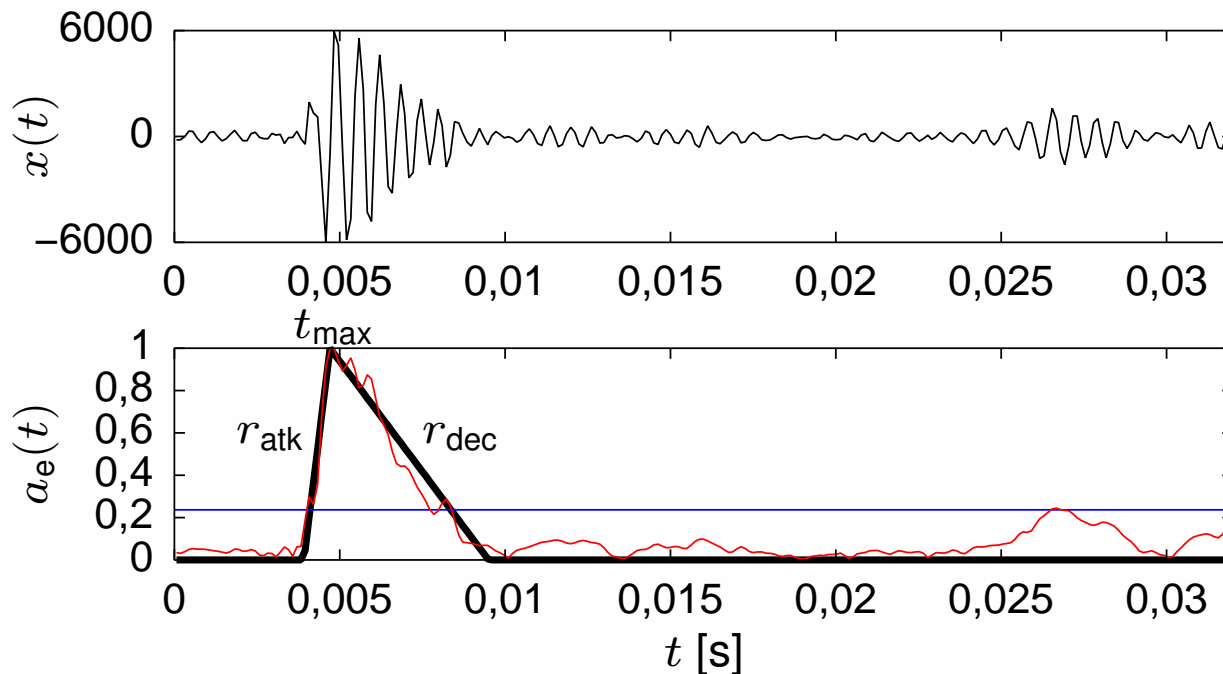
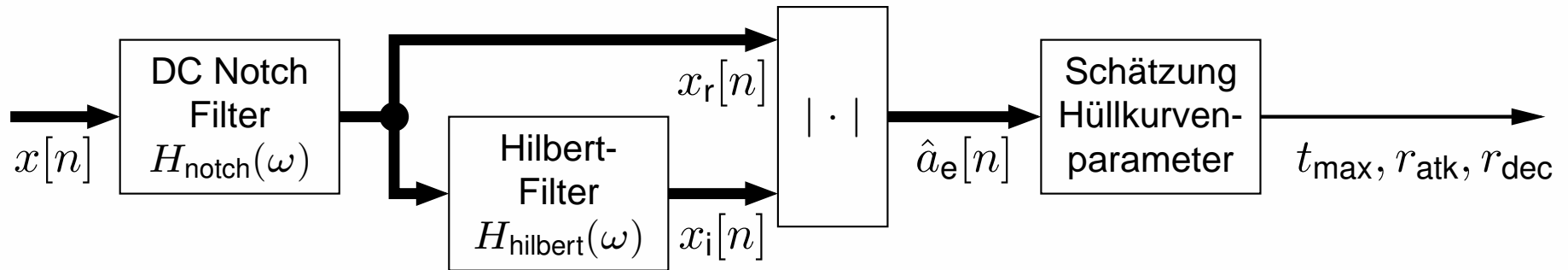
$$I_h = 24$$

$$f_h = 220,5 \text{ Hz}$$

$$a_h = 1766 \text{ (64,9 dB)}$$

- Linienspektrum mit Partialtonamplituden  $a_{i,h}$   
→ Autokorrelationsfunktion  $r_{xx}[k]$
- Levinson-Durbin Algorithmus  
→ Filterkoeffizienten  $a_p$  für Allpol-Filter mit Ordnung  $P$

# Transienten: Parameter der zeitlichen Hüllkurve



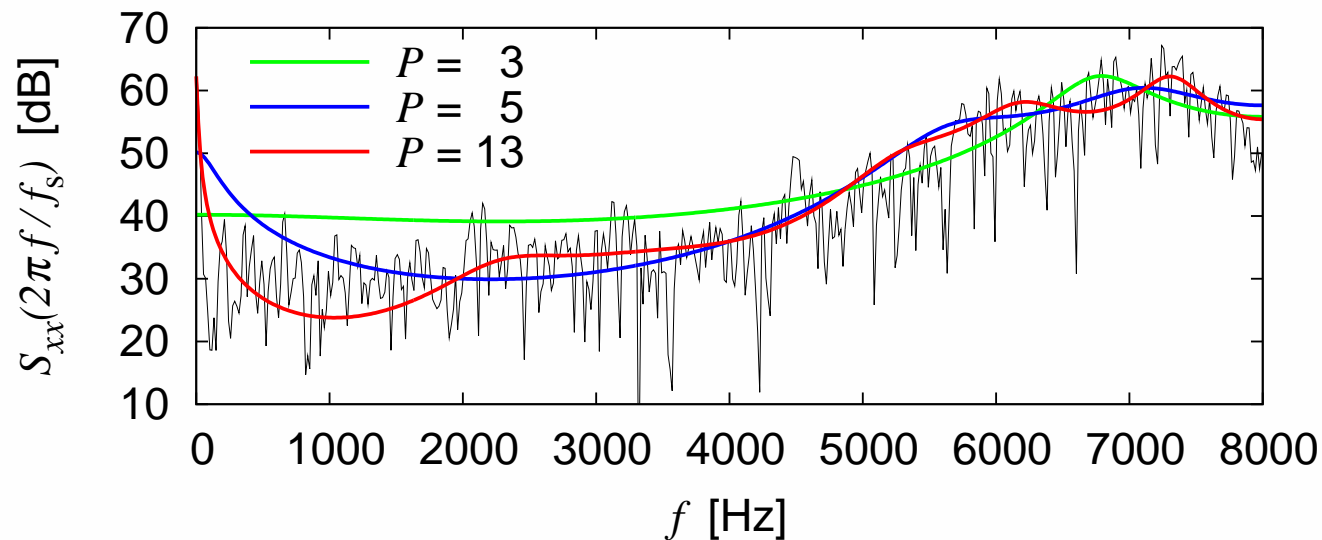
Schätzung von  $t_{\max}$ ,  $r_{\text{atk}}$ ,  $r_{\text{dec}}$  mittels gewichteter Regression

$$\hat{a}_e(t) / \hat{a}_e(t_{\max})$$

$$\text{RMS von } \hat{a}_e(t) / \hat{a}_e(t_{\max})$$

- Hüllkurve optional für einzelne Komponenten

# Rauschkomponente: Allpol-Modell der spektralen Hüllkurve



$$a_n = 459 \text{ (53,2 dB)}$$

$$f_s = 16 \text{ kHz}$$

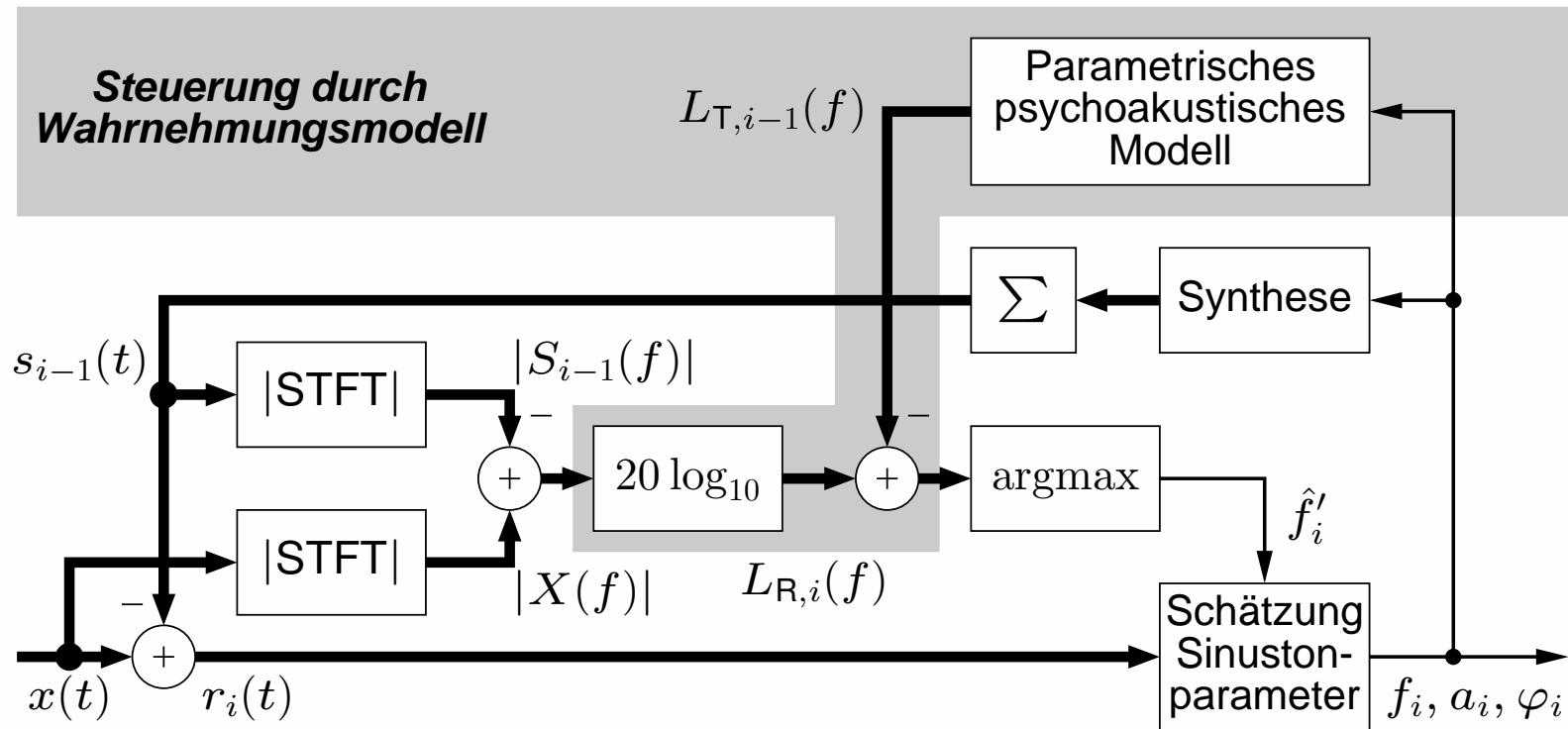
- Leistungsdichtespektrum  $S_{rr}(\omega)$   
→ Autokorrelationsfunktion  $r_{xx}[k]$
- Levinson-Durbin Algorithmus  
→ Filterkoeffizienten  $a_p$  für Allpol-Filter mit Ordnung  $P$

# Gliederung

---

- Einleitung
- Grundlagen der parametrischen Audiocodierung
- Quellenmodell und Parameterschätzung
- **Signalzerlegung und Auswahl von Signalkomponenten**
- Parametercodierung und Signalsynthese
- Experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Analyse-Synthese-Schleife mit Wahrnehmungsmodell



- **Ziel:** Auswahl der wichtigsten Komponenten für die Übertragung
- Parametrisches psychoakustisches Modell (Simultanverdeckung)
  - Extraktion geordnet nach wahrnehmungsmäßiger Relevanz

# Wahrnehmungsorientierte Zerlegung: Rauschen + Sinustöne

---

- **Genereller Ansatz**

Rauschkomponente = Residualspektrum nach Sinustonextraktion

- Rauschen **nicht** als Sinustöne modellieren

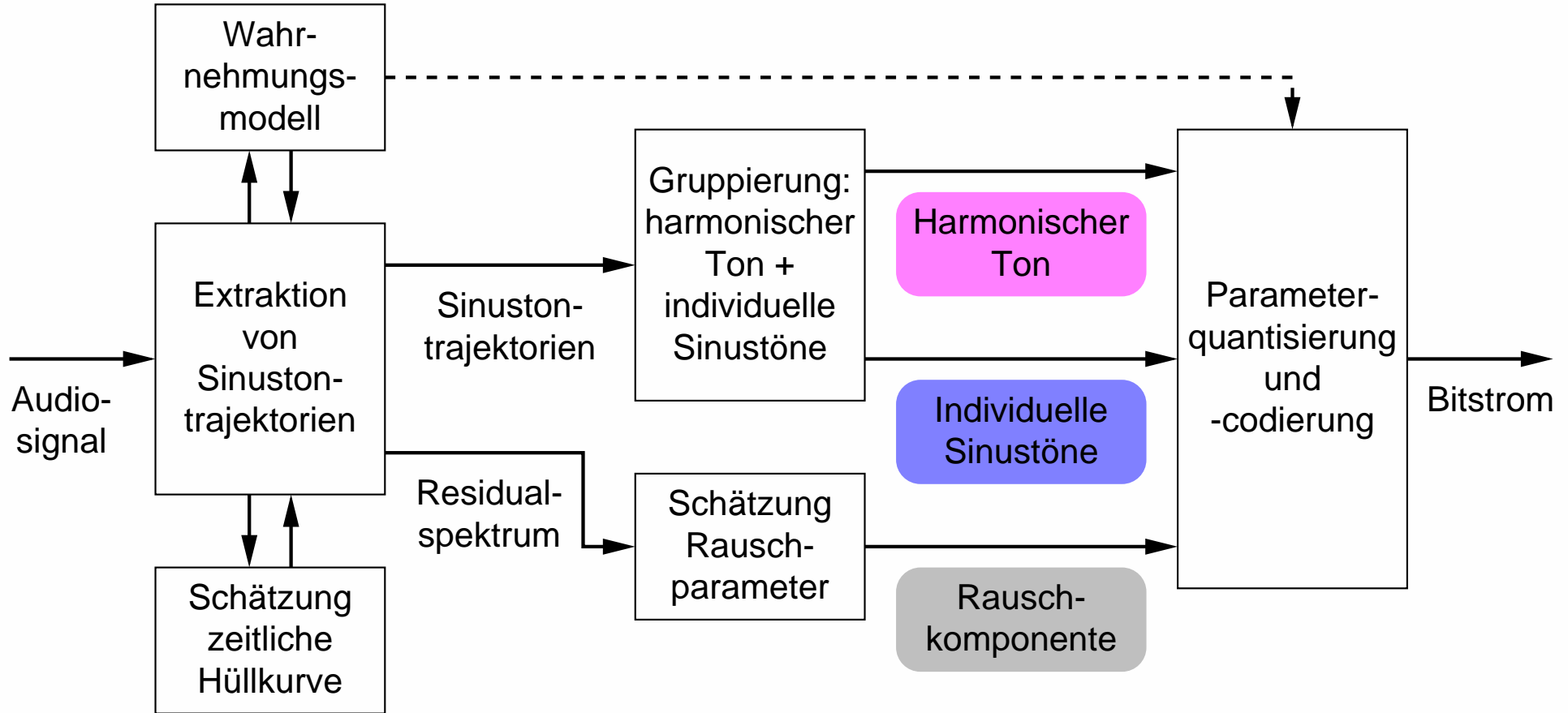
- Sinustöne nur extrahieren wenn sie signifikant zur Energie im betrachteten Frequenzband beitragen
- Keine Sinustonextraktion in Frequenzbereichen mit flachem Spektrum (→ Wahrnehmung als Rauschen)

- Sinustöne **nicht** als Rauschen modellieren

- Alle wesentlichen Sinustöne extrahieren  
(auch wenn nicht alle übertragen werden können)



# Signalzerlegung und Komponentenauswahl im HILN-Encoder



# Gliederung

---

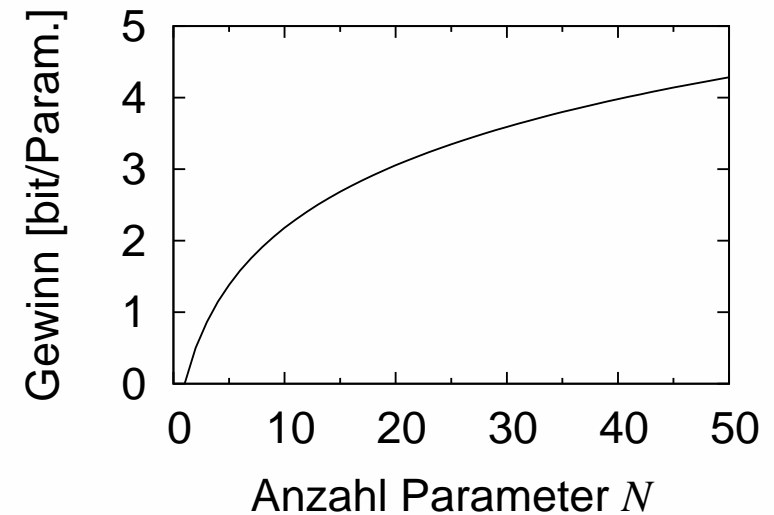
- Einleitung
- Grundlagen der parametrischen Audiocodierung
- Quellenmodell und Parameterschätzung
- Signalzerlegung und Auswahl von Signalkomponenten
- **Parameterkodierung und Signalsynthese**
- Experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung

# Parameterquantisierung und -codierung

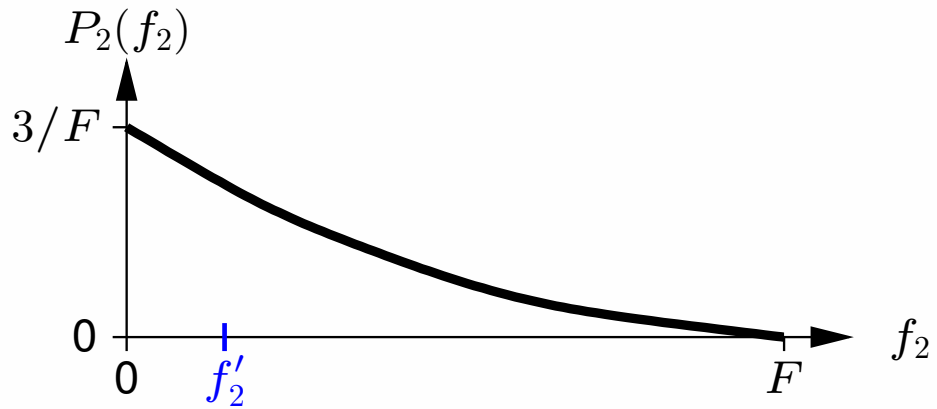
- Quantisierung der Modellparameter mit Quantisierungsstufen gemäß Wahrnehmungsschwelle (→ geeignete Skala)
  - Amplitude: 1,5 dB (bei Beginn eines Sinustons: 3 dB)
  - Frequenz: 1/32 Bark (< 500 Hz: 3,1 Hz; > 500 Hz: 10 cent)
  - Grundfrequenz: 4,5 cent
  - Allpol-Filterkoeffizienten → Reflektionskoeffizienten (LAR)
    - ermöglicht effiziente Inter-Frame-Prädiktion & Quantisierung der Filterkoeffizienten mit **veränderlicher** Filterordnung  $P$
- Entropiecodierung
  - Codebücher mit variabler Codewortlänge
  - Differentielle Codierung für fortgesetzte Komponenten
  - Frequenzparameter neuer Sinustöne: Subdivision Coding

# Subdivision Coding: Motivation

- **Problem:** Codierung der Frequenzparameter neuer Sinustöne
  - Menge von  $N$  Parametern
  - Reihenfolge irrelevant
- **Idee:**  $N!$  mögliche Permutationen  
→ Sparpotential  $\log_2(N!)$  bit
- **Umsetzung:**
  - Sortierte Übertragung:  $0 \leq f_{N-1} \leq \dots \leq f_1 \leq f_0 < F$
  - Wertebereich für Parameter  $f_n$  ist  $f_{n+1} \leq f_n < F$
  - Form der Verteilung  $P_n(f_n - f_{n+1})$  ist abhängig von Anzahl  $n$  der noch zu übertragenden Parameter



# Subdivision Coding: Beispiel für $N = 3$ Parameter

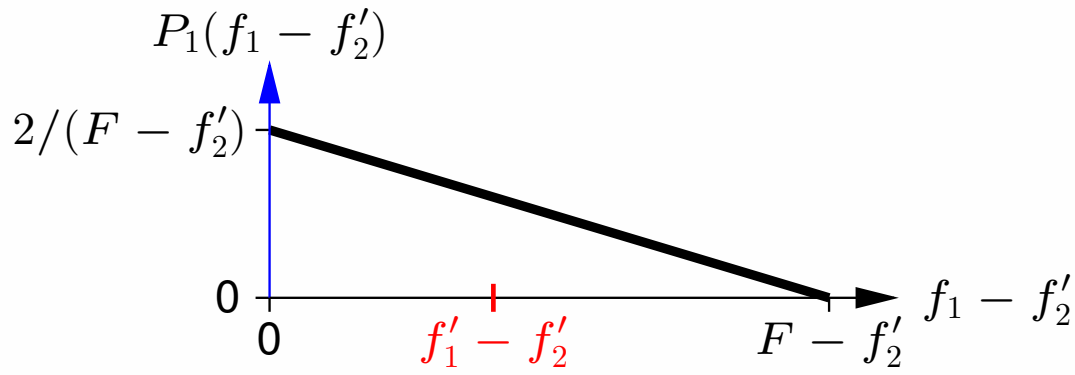


Parameter

$$f'_2 = 0,15F$$

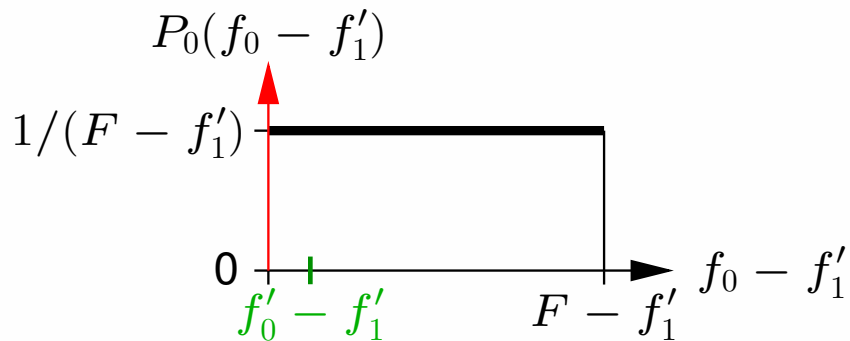
$$f'_1 = 0,49F$$

$$f'_0 = 0,55F$$

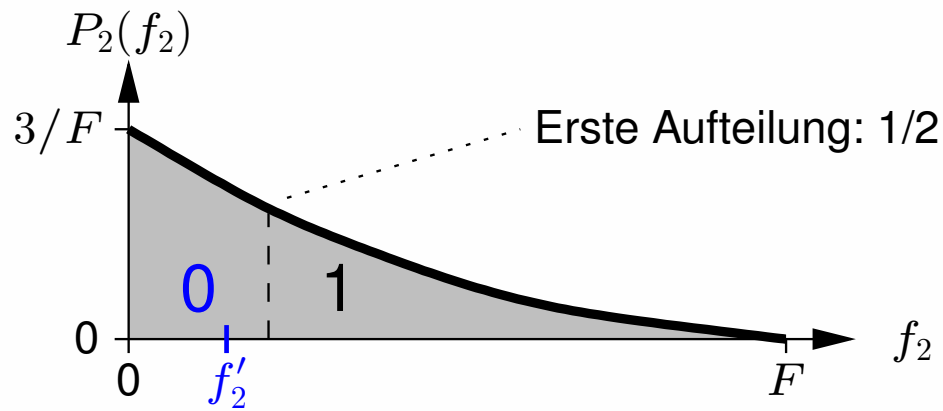


**Annahme:**

Unabhängige  
Gleichverteilung der  
Frequenzparameter



# Subdivision Coding: Dynamische Konstruktion des Codes

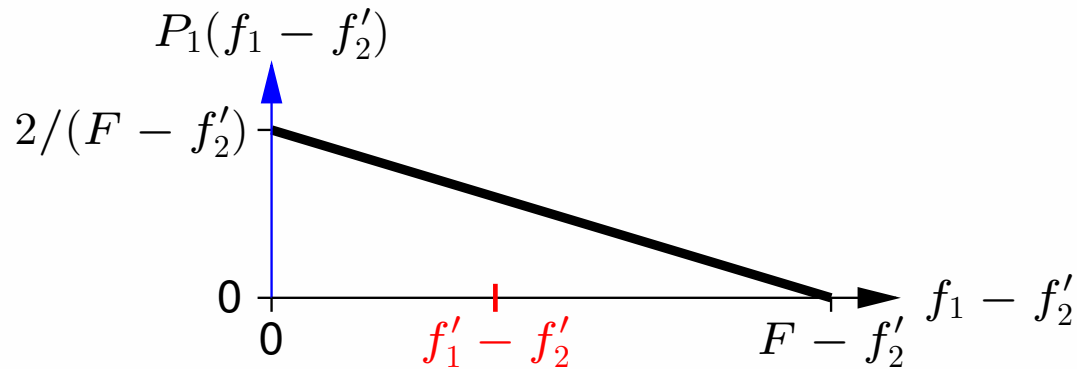


Parameter      Code

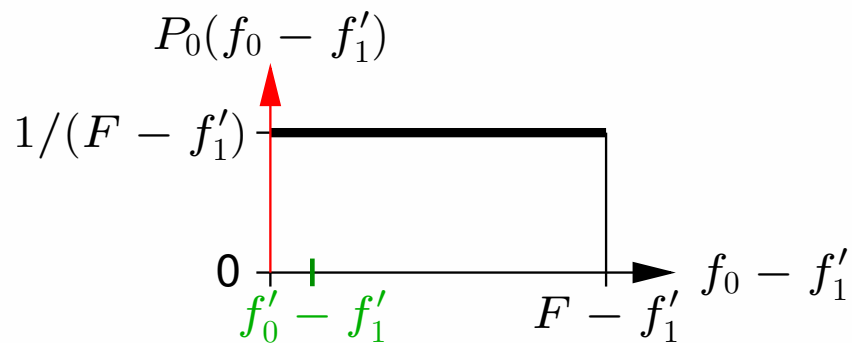
$$f'_2 = 0,15F \quad 0$$

$$f'_1 = 0,49F$$

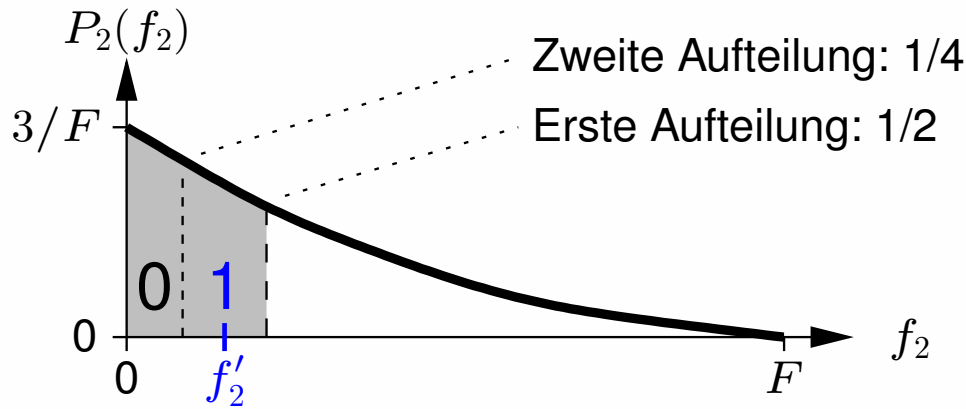
$$f'_0 = 0,55F$$



**Code-Konstruktion:**  
 Rekursive Aufteilung in  
 gleichwahrscheinliche  
 Hälften



# Subdivision Coding: Dynamische Konstruktion des Codes

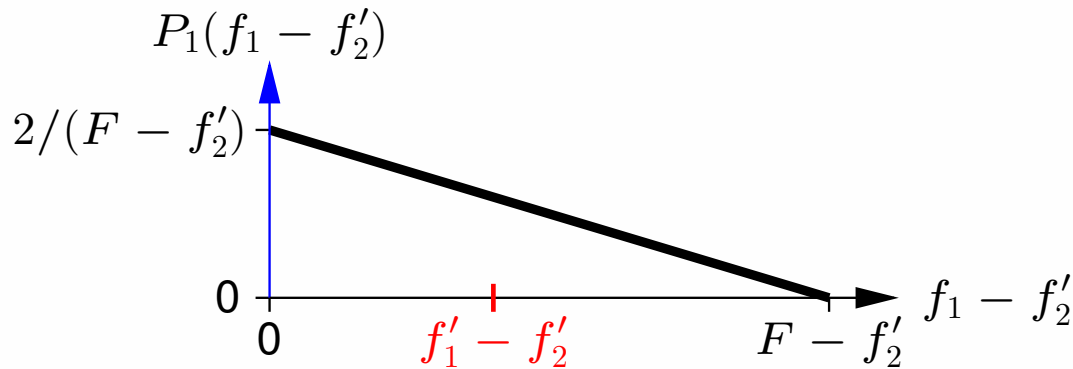


Parameter      Code

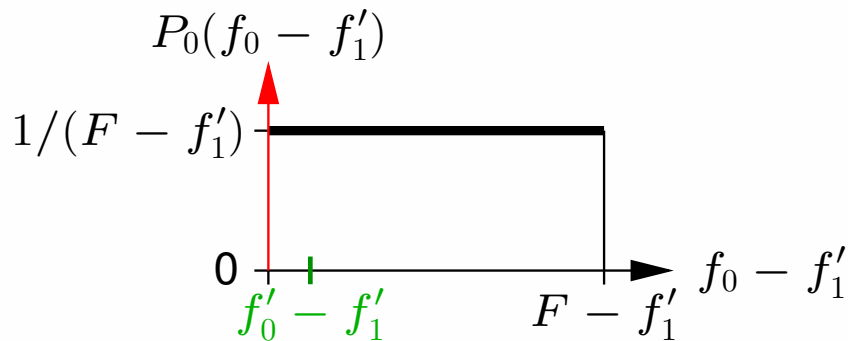
$f'_2 = 0,15F$       01...

$f'_1 = 0,49F$

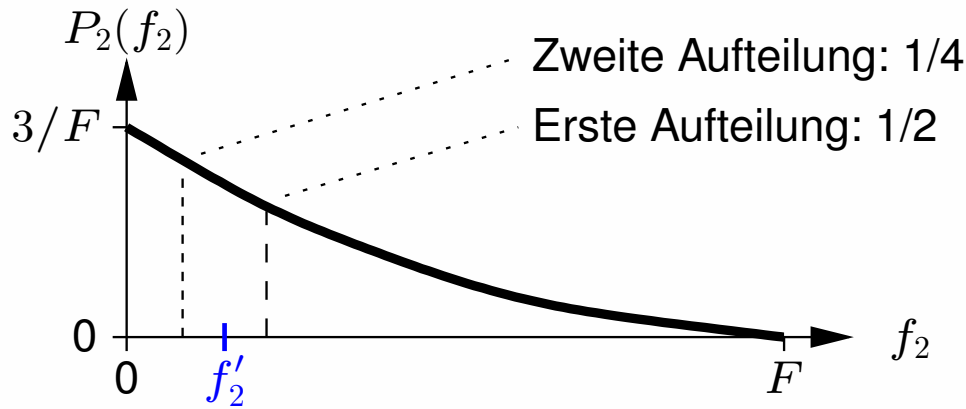
$f'_0 = 0,55F$



**Code-Konstruktion:**  
 Rekursive Aufteilung in  
 gleichwahrscheinliche  
 Hälften



# Subdivision Coding: Dynamische Konstruktion des Codes

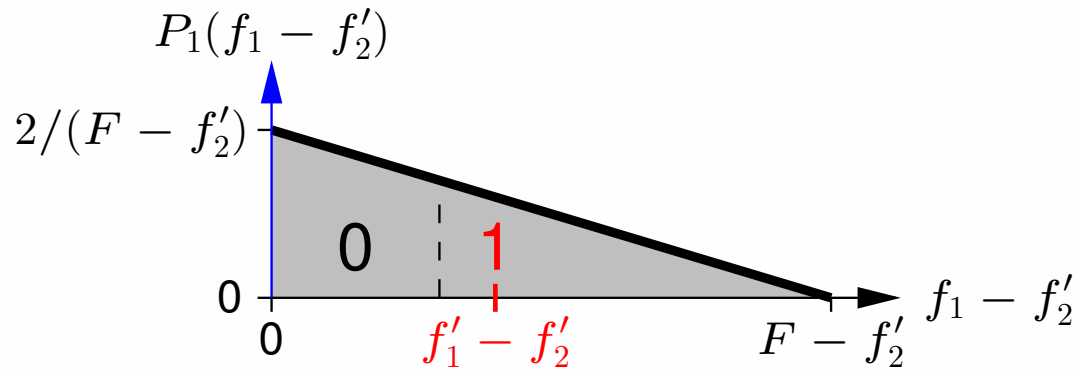


Parameter      Code

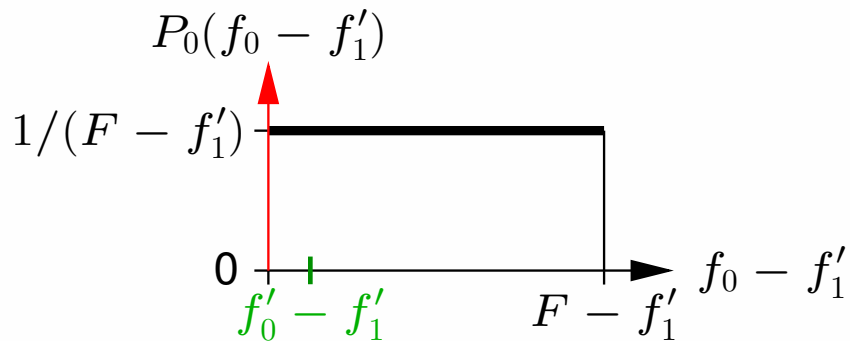
$f'_2 = 0,15F$       01...

$f'_1 = 0,49F$       1

$f'_0 = 0,55F$

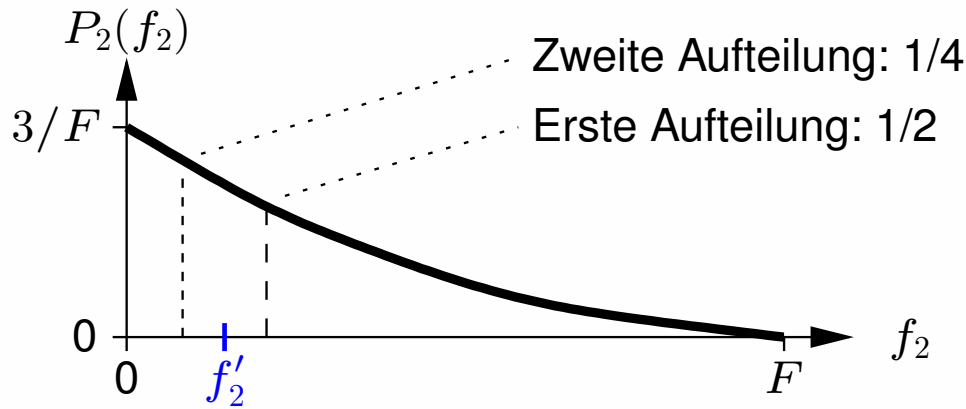


**Code-Konstruktion:**  
 Rekursive Aufteilung in  
 gleichwahrscheinliche  
 Hälften





# Subdivision Coding: Dynamische Konstruktion des Codes

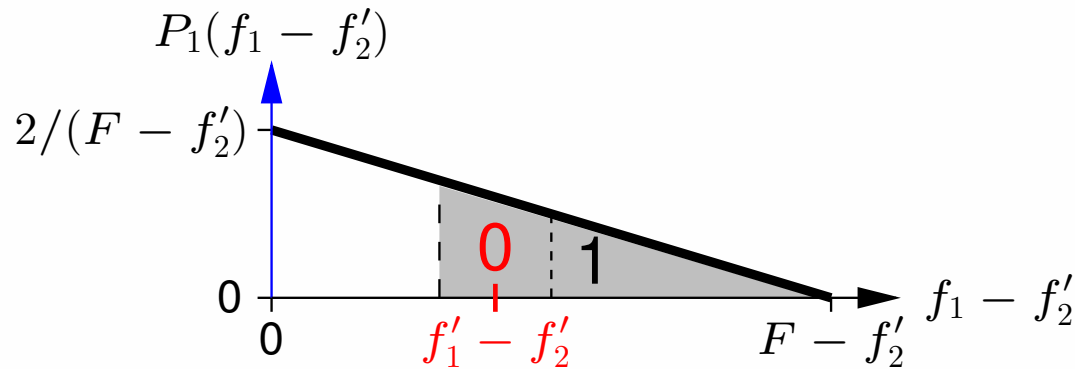


Parameter      Code

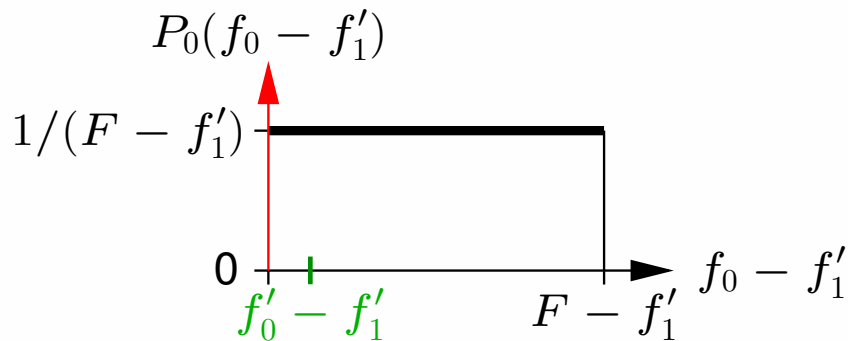
$f'_2 = 0,15F$       01...

$f'_1 = 0,49F$       10...

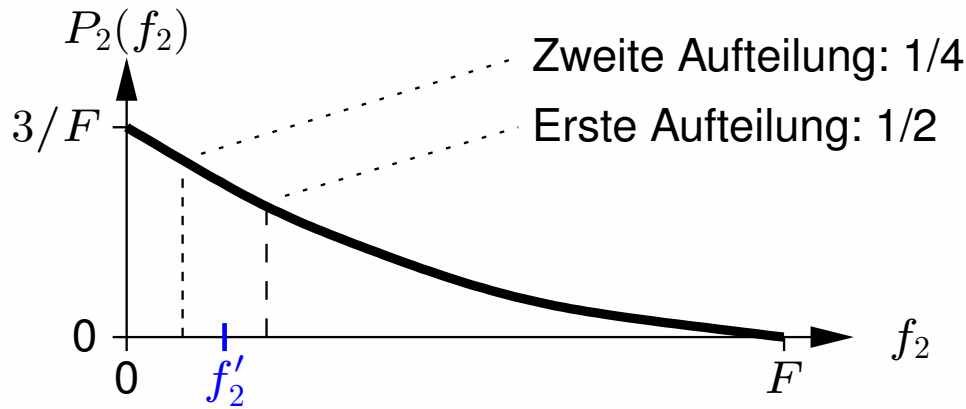
$f'_0 = 0,55F$



**Code-Konstruktion:**  
 Rekursive Aufteilung in  
 gleichwahrscheinliche  
 Hälften



# Subdivision Coding: Dynamische Konstruktion des Codes

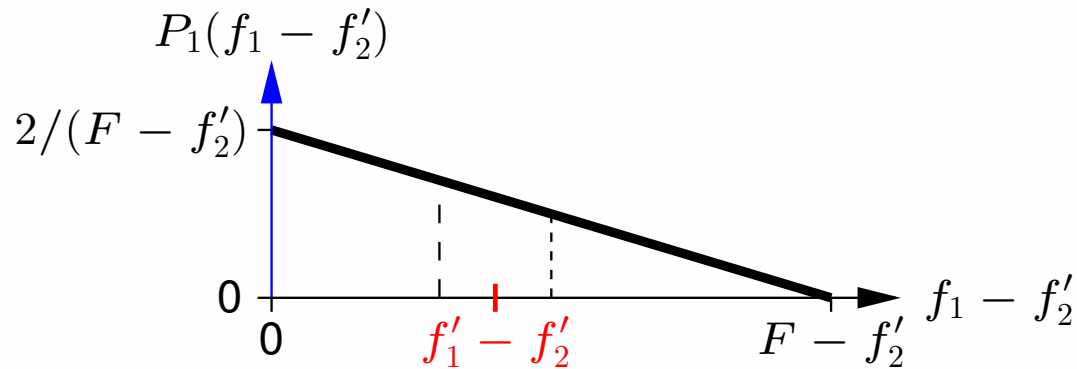


Parameter      Code

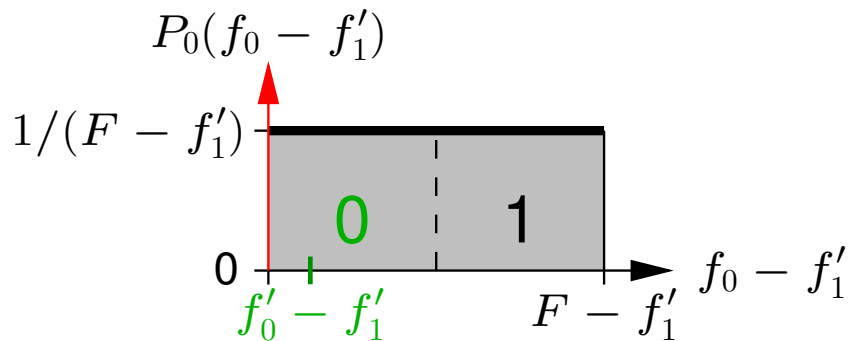
$f_2' = 0,15F$       01...

$f_1' = 0,49F$       10...

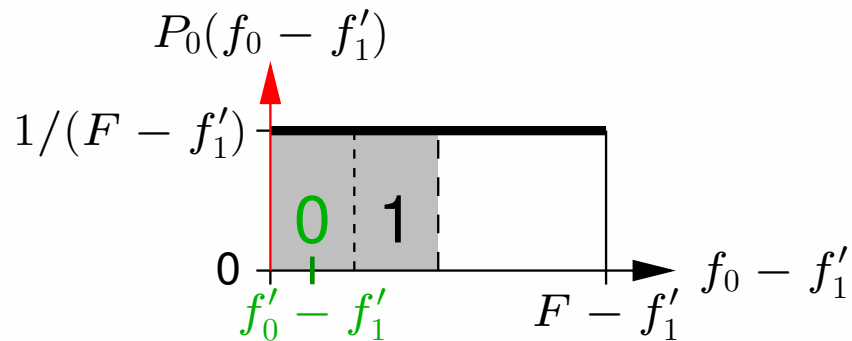
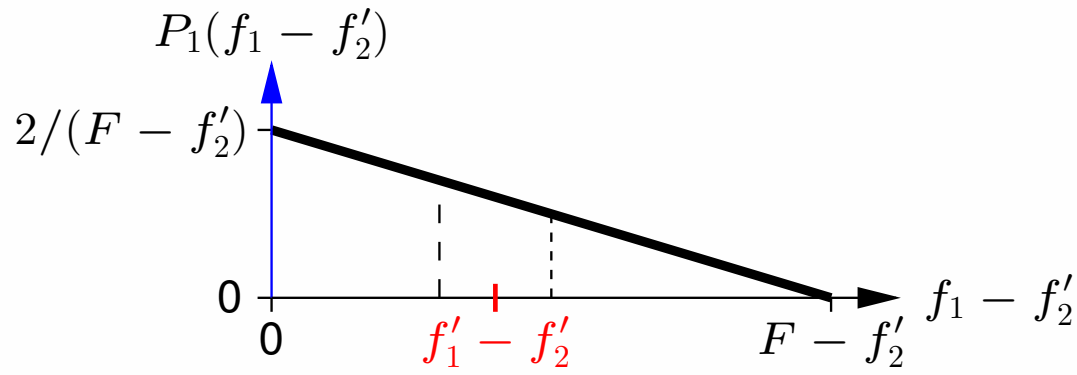
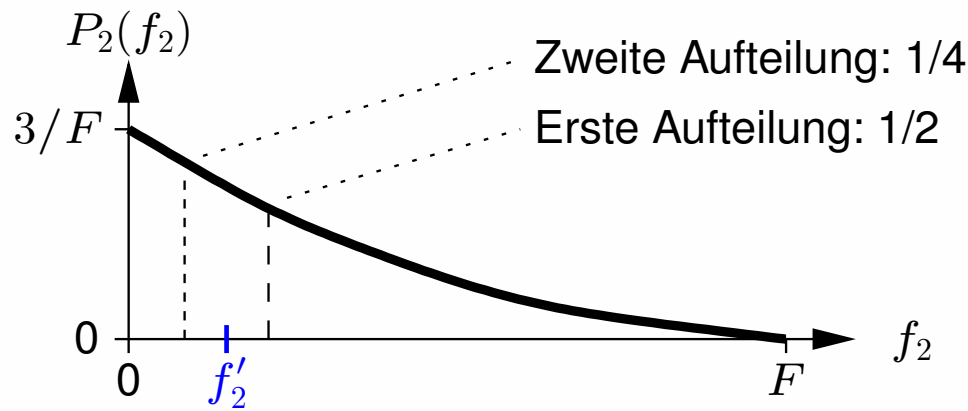
$f_0' = 0,55F$       0



**Code-Konstruktion:**  
 Rekursive Aufteilung in  
 gleichwahrscheinliche  
 Hälften



# Subdivision Coding: Dynamische Konstruktion des Codes

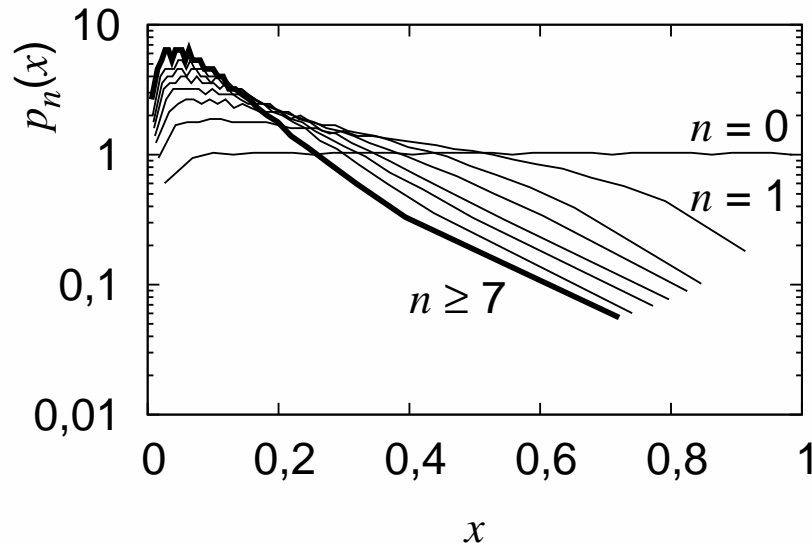


| Parameter      | Code  |
|----------------|-------|
| $f'_2 = 0,15F$ | 01... |
| $f'_1 = 0,49F$ | 10... |
| $f'_0 = 0,55F$ | 00... |

**Code-Konstruktion:**  
 Rekursive Aufteilung in  
 gleichwahrscheinliche  
 Hälften

# Subdivision Coding: Ergebnisse

Form der Verteilung (aus Messung)

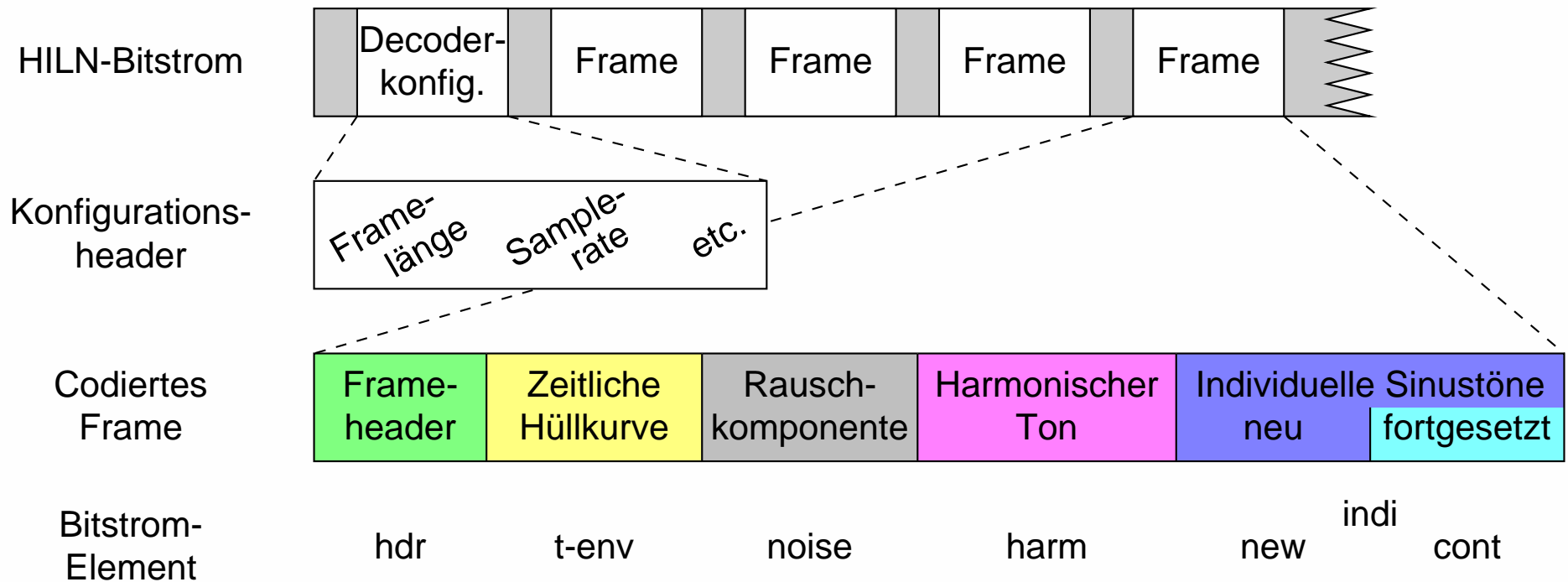


8 tabellierte  
Formen der  
Verteilung:  
 $n = 0, \dots, 6$   
 $n \geq 7$

| Quantisierte Frequenzparameter | Wertebereich | Entropie [bit] | CWL [bit] |
|--------------------------------|--------------|----------------|-----------|
| Subdivision Coding             | 0, ..., 602  |                | 5,945     |
| Absolute Codierung             | 0, ..., 602  | 8,826          |           |
| Differenzielle Codierung       | 0, ..., 602  | 6,534          |           |

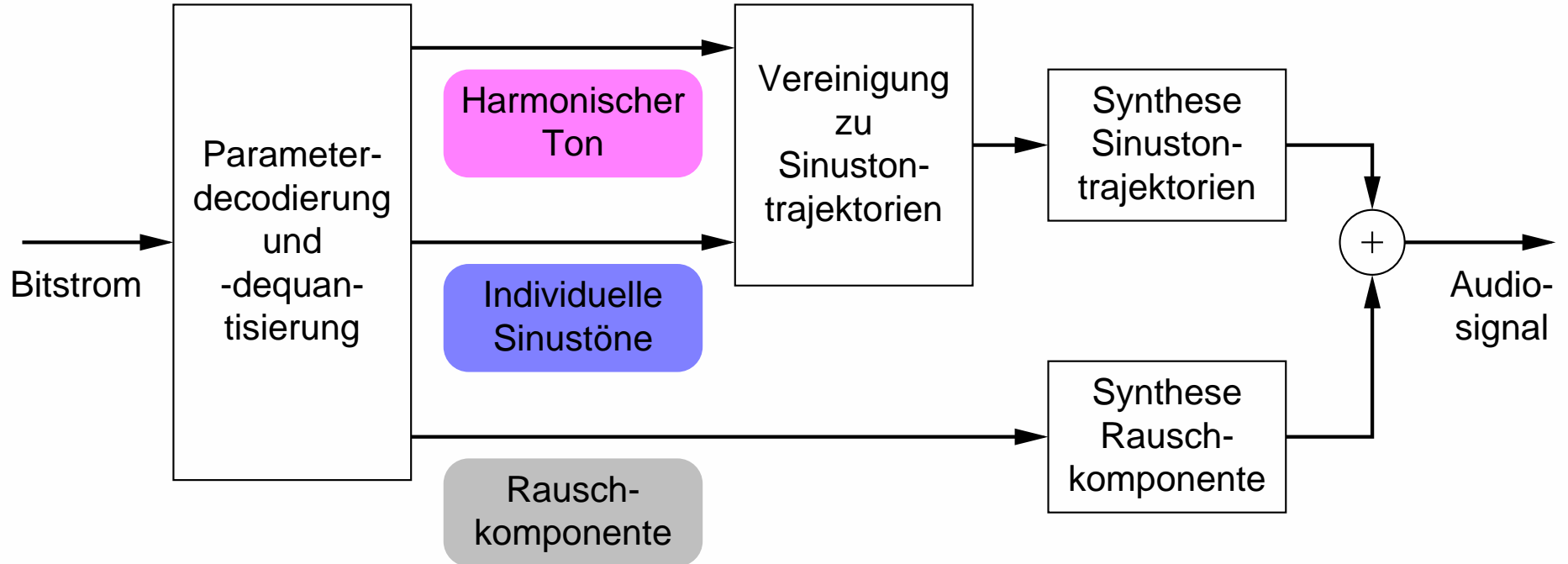
39 Testsignale (667,7 s) codiert mit 6 und 16 kbit/s

# Encoder: Bitzuteilung mit Rate/Distortion-Steuerung

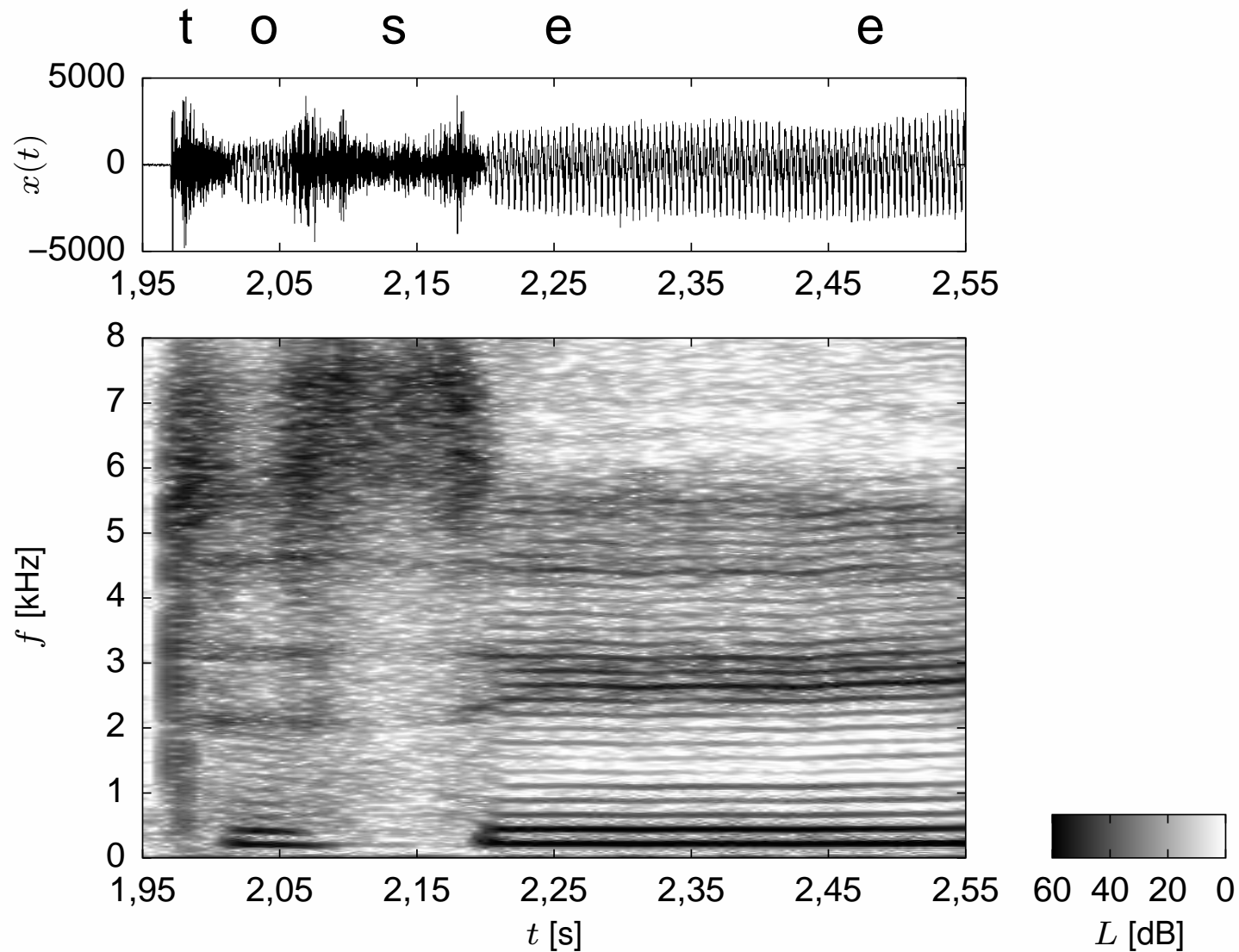


- Anzahl Parameter für spektrale Hüllkurve (Ordnung Allpol-Filter) gemäß Relevanz von harmonischem Ton & Rauschkomponente
- Verbleibende Bits für wichtigste individuelle Sinustöne
- Bitreservoir-Steuerung (für kurze schwierige Signalabschnitte)

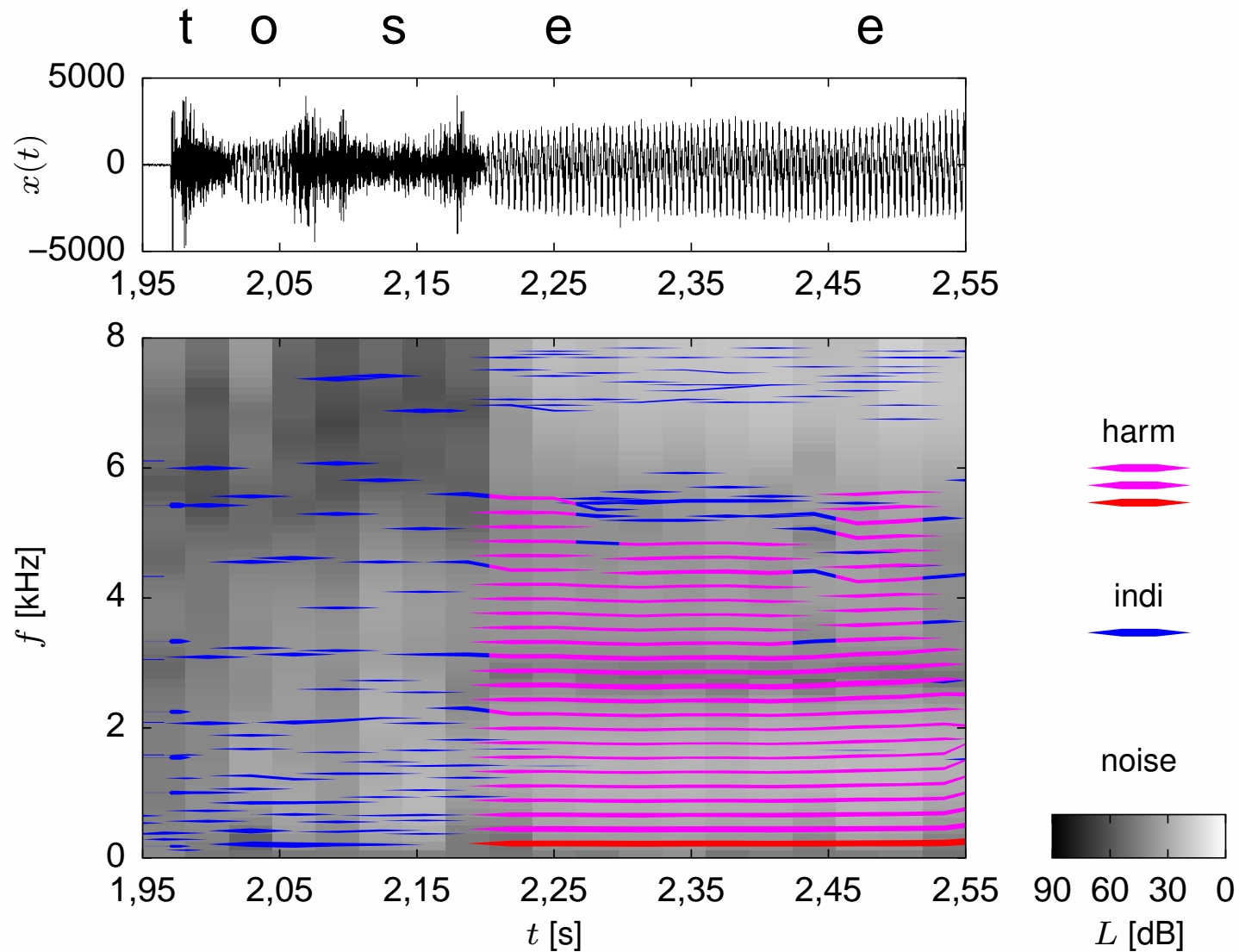
# Parameterdecodierung und Signalsynthese im HILN-Decoder



# Originalsignal: "to see" (Suzanne Vega)

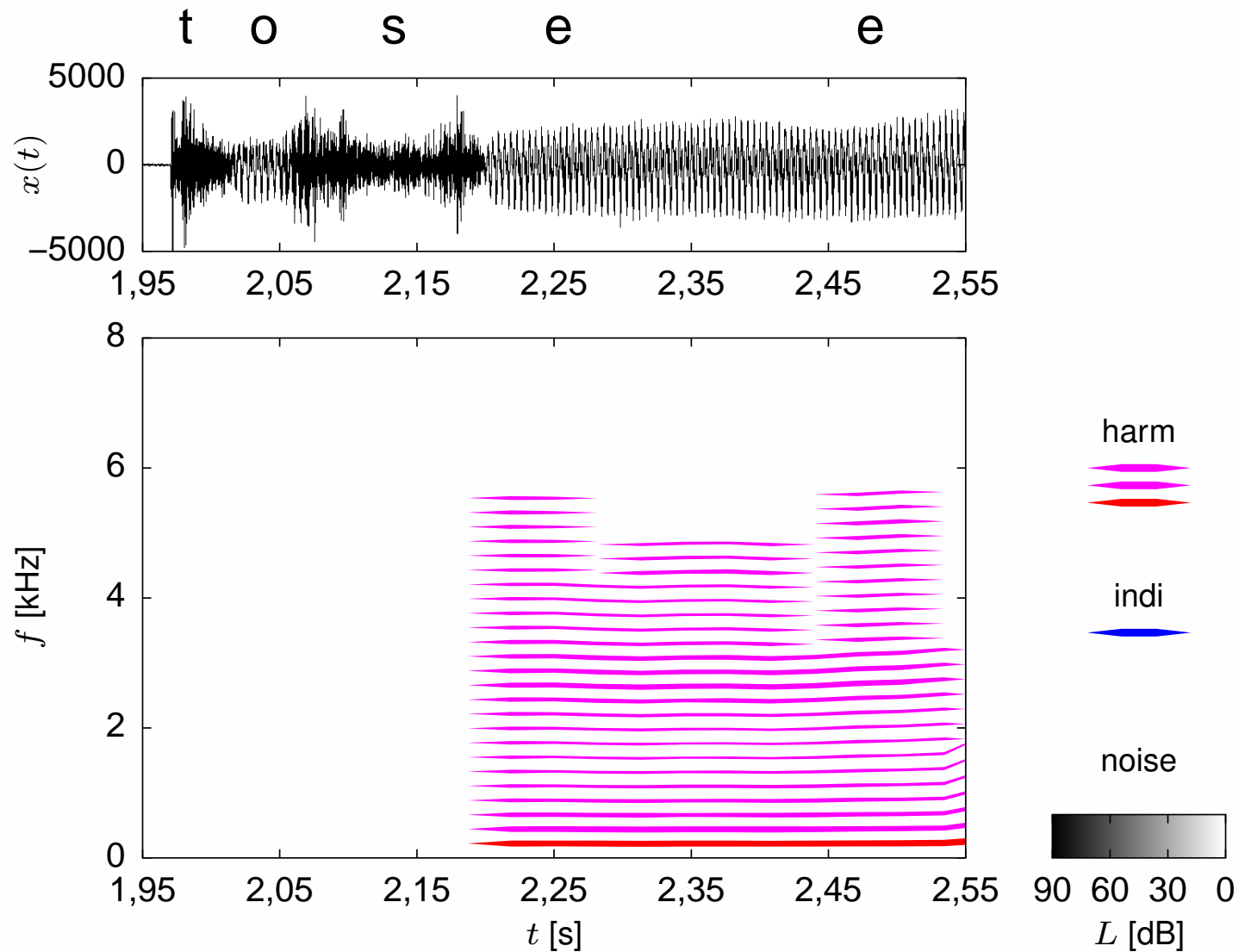


# Parametrische Darstellung: Alle Komponenten

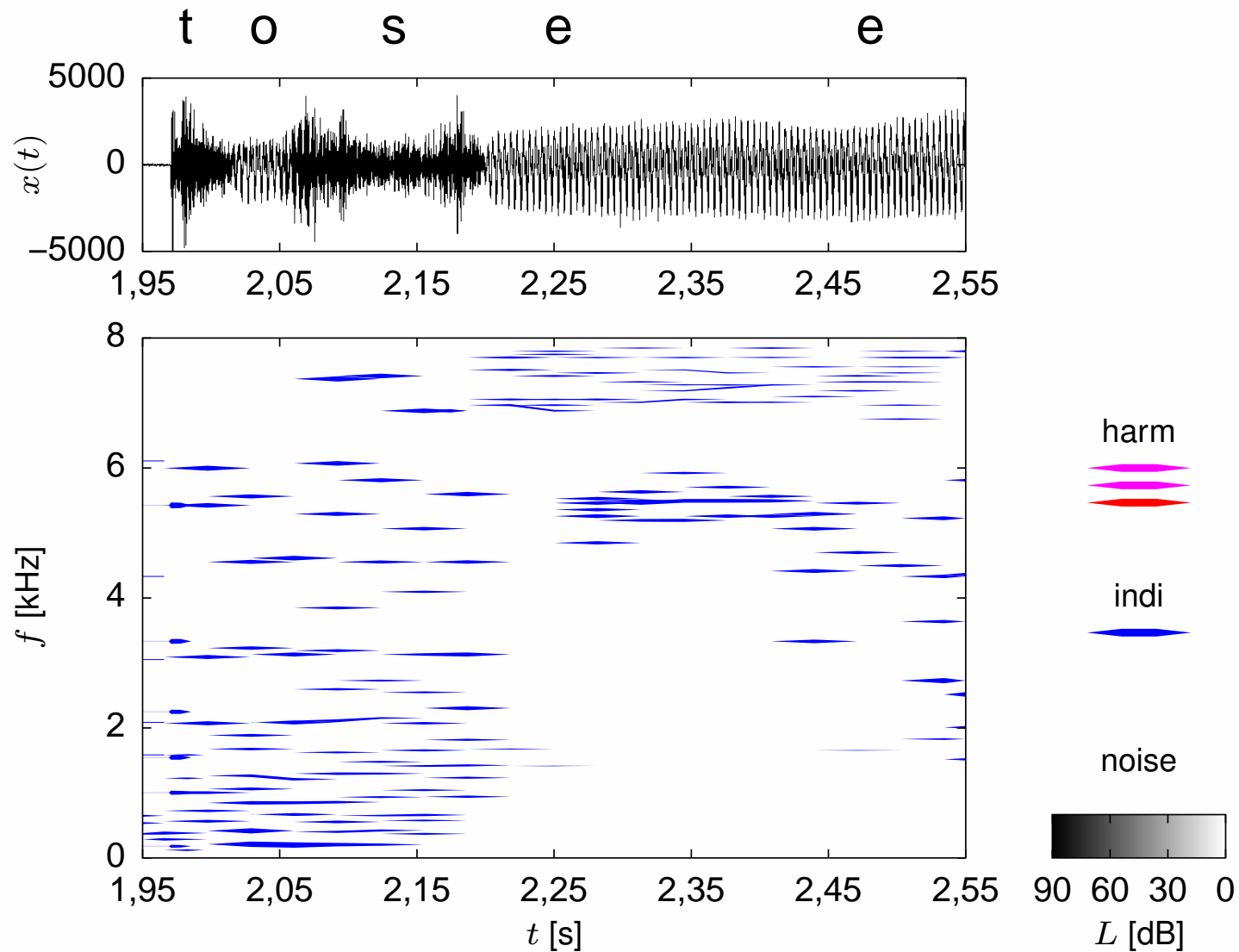




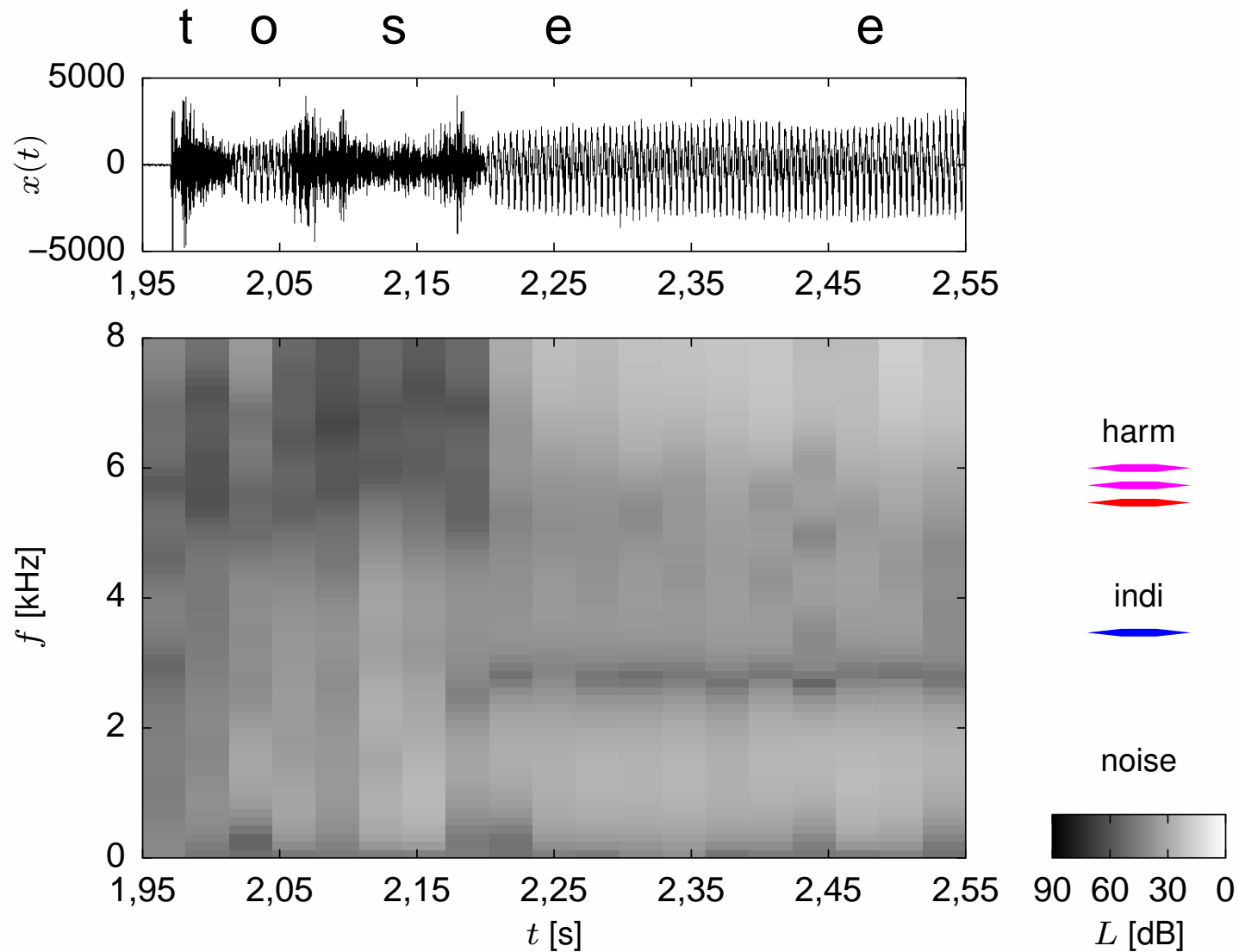
# Parametrische Darstellung: Harmonischer Ton



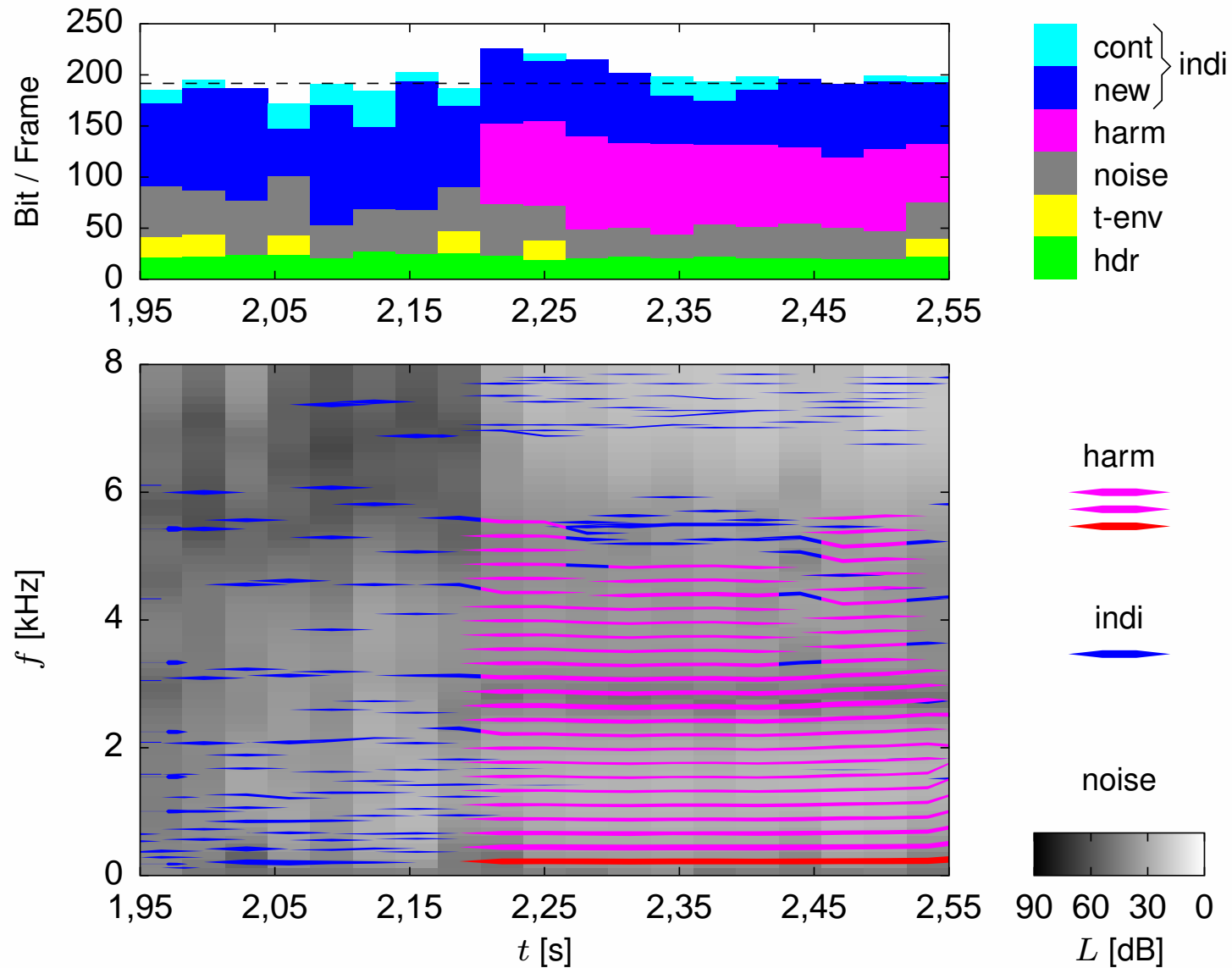
# Parametrische Darstellung: Individuelle Sinustöne



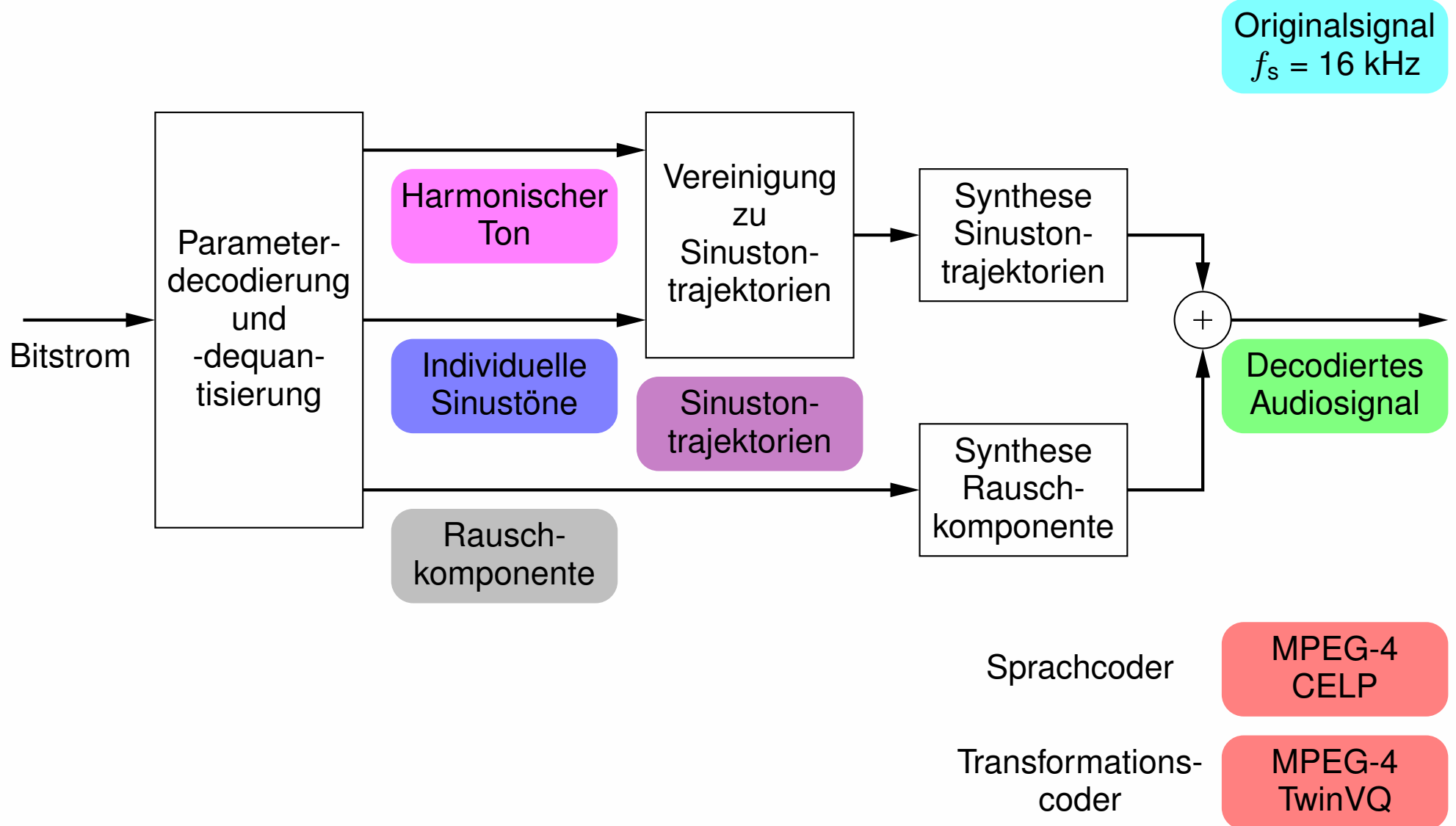
# Parametrische Darstellung: Rauschkomponente

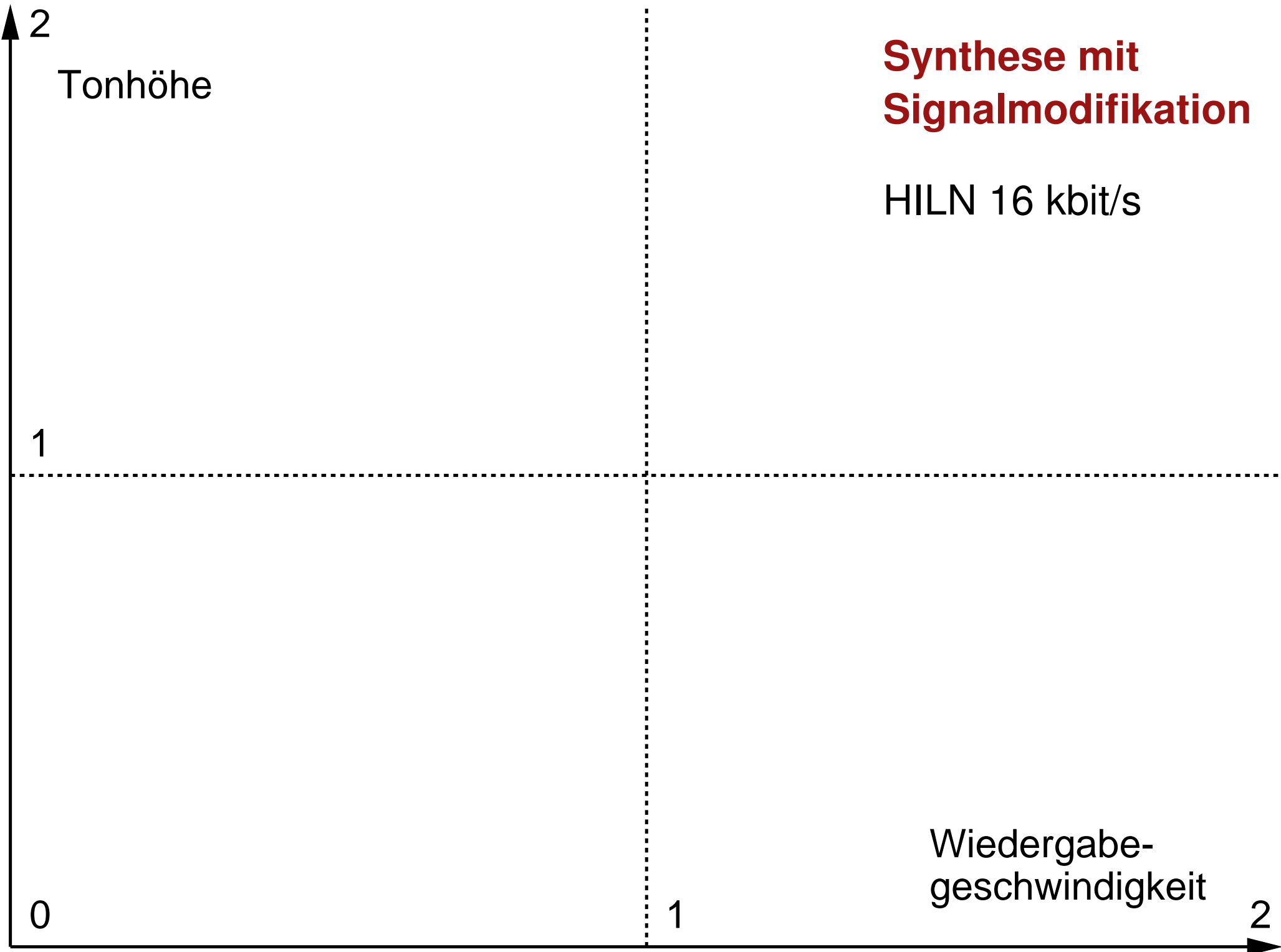


# Parametrische Darstellung: Bitzuteilung 6 kbit/s



# HILN-Codierung: Beispiel 6 kbit/s



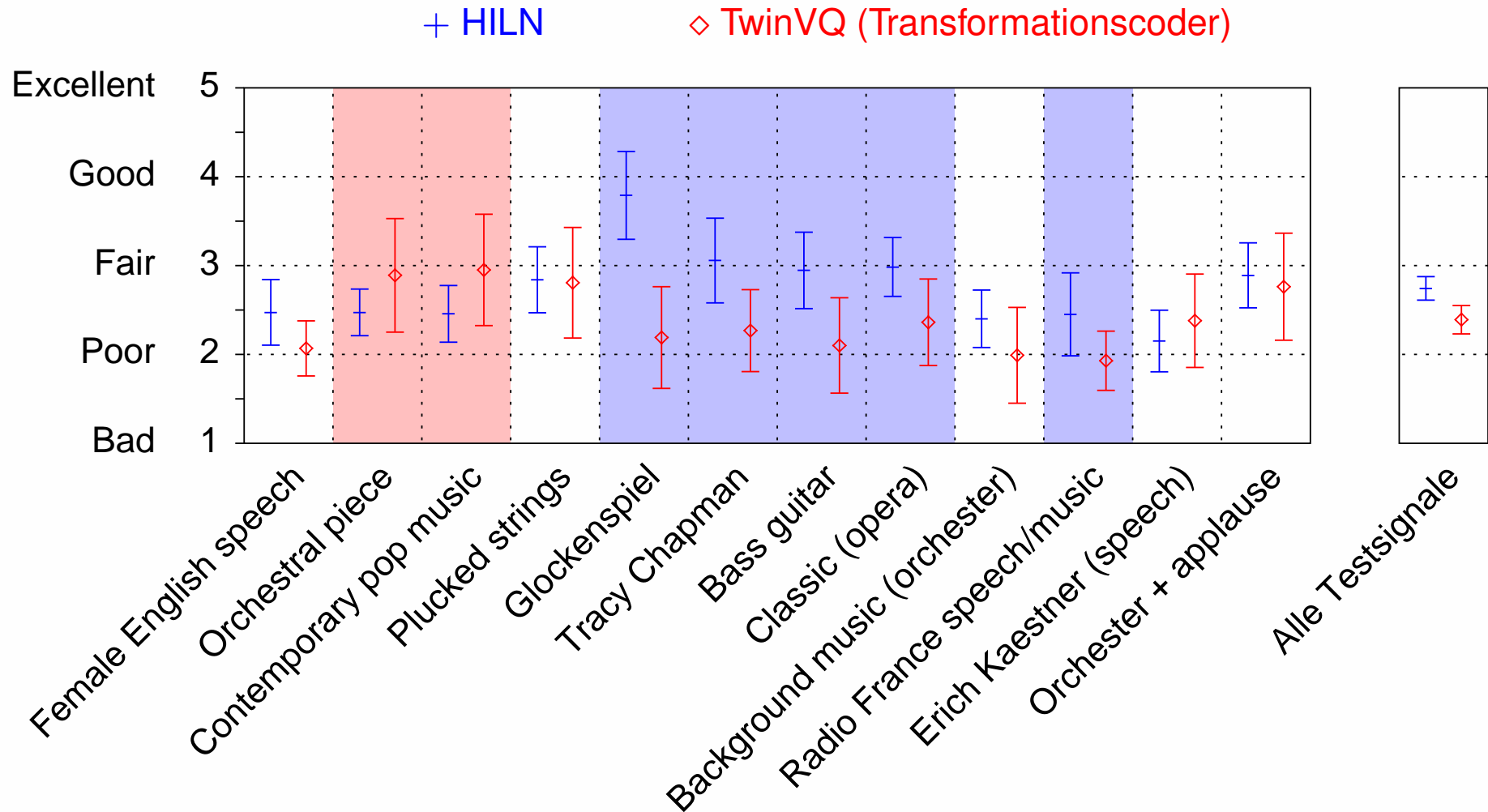


# Gliederung

---

- Einleitung
- Grundlagen der parametrischen Audiocodierung
- Quellenmodell und Parameterschätzung
- Signalzerlegung und Auswahl von Signalkomponenten
- Parametercodierung und Signalsynthese
- Experimentelle Ergebnisse
- Zusammenfassung

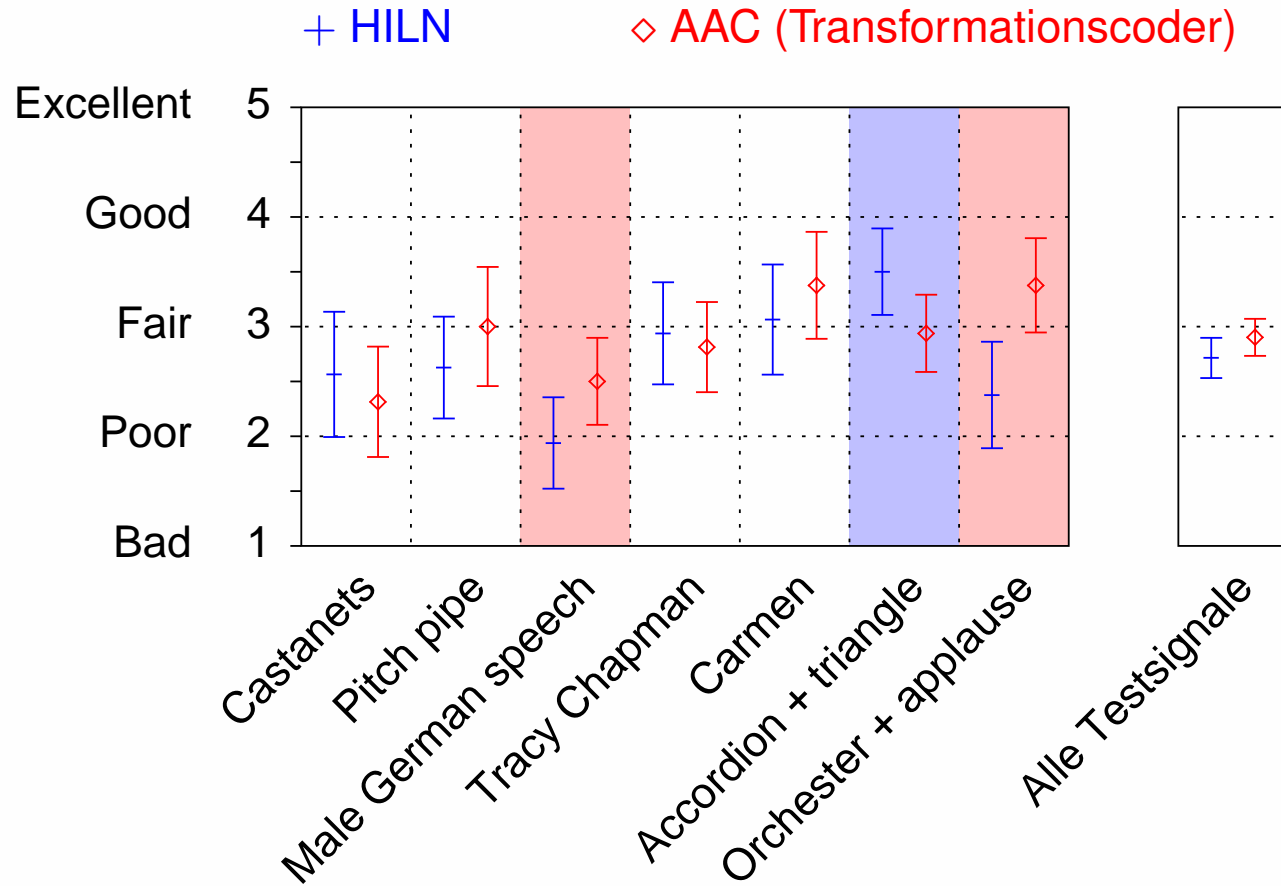
# Hörtest: 6 kbit/s (MOS mit 95% CI)



MPEG-4 Core Experiment: 9 Hörer (Uni Hannover)



# Hörtest: 16 kbit/s (MOS mit 95% CI)



MPEG-4 Verifikationstest: 16 Hörer (Samsung)

# Zusammenfassung

---

- Entwicklung eines kompletten parametrischen Audiocoders
  - Codierungseffizienz bei 6 und 16 kbit/s  
vergleichbar mit Transformationscodern
  - Standardisiert als MPEG-4 HILN
- Wesentliche Beiträge
  - Hybrides parametrisches Quellenmodell
    - Sinustöne + harmonischer Ton + Rauschen (+ Transienten)
  - Robuste Signalzerlegung und Parameterschätzung
    - Phasen-Verfolgung von Sinuston-Trajektorien
  - Wahrnehmungsmodell für Komponentenauswahl
    - ermöglicht sehr niedrige Datenraten
  - Effiziente gemeinsame Codierung der Sinuston-Parameter
    - Subdivision Coding